Karl R. Popper

Post Scriptum a La lógica de investigación científica. Vol. III

Teoría cuántica y el cisma en Física

Edición preparada por W. W. Bartley III

tecnos

1460
19/09

SERIE DE FILOSOFÍA Y ENSAYO

Dirigida por Manuel Garrido

Alston, W. P.; Edwards, P.; Malcolm, N.; Nelson, J. O., y Prior, A.: *Los orígenes de la filosofía analítica. Moore, Russell, Wittgenstein.*
Austin, J. L.: *Sentido y percepción.*
Boden, M. A.: *Inteligencia artificial y hombre natural.*
Bottomore, T.; Harris, L.; Kiernan, V. G.; Miliband, R.; con la colaboración de Kolakowski, L.: *Diccionario del pensamiento marxista.*
Brown, H. I.: *La nueva filosofía de la ciencia.*
Bunge, M.: *El problema mente-cerebro.*
Couturat, Louis: *El álgebra de la lógica.*
Chrisholm, R. M.: *Teoría del conocimiento.*
Díaz, Elías: *Revisión de Unamuno.* Análisis crítico de su pensamiento político.
Doop, Joseph: *Nociones de lógica formal.*
Edelman, B.: *La práctica ideológica del Derecho.*
Fann, K. T.: *El concepto de filosofía en Wittgenstein.*
Ferrater Mora, J., y otros: *Filosofía y ciencia en el pensamiento español contemporáneo (1960-1970).*
Feyerabend, P.: *Tratado contra el método.* Esquema de una teoría anarquista del conocimiento.
García Suárez, A.: *La lógica de la experiencia.*
Garrido, M.: *Lógica simbólica.*
Gómez García, P.: *La antropología estructural de Claude Lévi-Strauss.*
Gurméndez, Carlos: *Ser para no ser.* Ensayo de una dialéctica subjetiva.
Hierro, José S.-P.: *Problemas del análisis del lenguaje moral.*
Hintikka, J.: *Lógica, juegos de lenguaje e información.* Temas kantianos de filosofía de la lógica.
Hintikka, J.: *Saber y creer.* Una introducción a la lógica de las dos nociones.
Kuhn, T. S.: *Segundos pensamientos sobre paradigmas.*
Lakatos, Imre, y otros: *Historia de la ciencia y sus reconstrucciones racionales* (2.ª ed.).
Lindsay, P. H., y Norman, D. A.: *Introducción a la psicología cognitiva* (2.ª ed.).
Lorenzen, Paul: *Metamatemática.*
Lorenzo, J. de: *El método axiomático y sus creencias.*
Lorenzo, J. de: *La filosofía de la matemática de Jules Henri Poincaré.*
Martín Santos, Luis, y otros: *Ensayos de filosofía de la ciencia.* Simposio de Burgos. En torno a la obra de Karl R. Popper.
Mates, Benson: *Lógica matemática elemental.*
París, Carlos: *Hombre y naturaleza.*
Popper, Karl R.: *Búsqueda sin término.* Una autobiografía intelectual.
Popper, Karl R.: *Realismo y el objetivo de la ciencia.* Post Scriptum a La lógica de la investigación científica, vol. I.
Popper, Karl R.: *El universo abierto.* Post Scriptum a La lógica de la investigación científica, vol. II.
Popper, Karl R.: *Teoría cuántica y el cisma en física.* Post Scriptum a La lógica de la investigación científica, vol. III.
Prior, A. N.: *Historia de la lógica.*
Quine, W. V.: *La relatividad ontológica y otros ensayos.*
Quintanilla, Miguel A.: *Idealismo y filosofía de la ciencia.* Introducción a la epistemología de Karl R. Popper.
Rama, Carlos M.: *Teoría de la historia.* Introducción a los estudios históricos (3.ª ed.).
Rescher, Nicolas: *La primacía en la práctica.*
Robinet, André: *Mitología, filosofía y cibernética.*
Rodríguez Paniagua, José M.ª: *¿Derecho natural o axiología jurídica?*
Rodríguez Paniagua, José M.ª: *Marx y el problema de la ideología.*
Sahakian, W. S.: *Historia y sistemas de la psicología.*
Smart, J. J. C., y Williams, B.: *Utilitarismo: pro y contra.*
Sotelo, Ignacio: *Sartre y la razón dialéctica.*
Strawson, P. F.: *Ensayos lógico-lingüísticos.*
Vargas Machuca, R.: *El poder moral de la razón.* La filosofía de Gramsci.
Veldman, D. J.: *Programación de computadoras en ciencias de la conducta.*
Wellman, C.: *Morales y éticas.*

TEORIA CUANTICA
Y EL CISMA EN FISICA

Digitized by the Internet Archive
in 2022 with funding from
Kahle/Austin Foundation

https://archive.org/details/postscriptumlalo0003popp

KARL R. POPPER

Post Scriptum a la lógica de la investigación científica

Volumen III

TEORIA CUANTICA Y EL CISMA EN FISICA

Edición preparada por
W. W. Bartley III

tecnos

Título original:
Quantum Theory and the Schism in Physics.
From the Postscript to the Logic of Scientific Discovery
Edited by W. W. Bartley III

Traducción:
Marta Sansigre Vidal

Diseño de cubierta:
J. M. Domínguez y J. Sánchez Cuenca

Impresión de cubierta:
Gráficas Molina

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de Editorial Tecnos, S. A.

© Karl R. Popper, 1956, 1982
© EDITORIAL TECNOS, S. A., 1985
O'Donnell, 27 - 28009 Madrid
ISBN: 84-309-1200-2
Depósito Legal: M-37353-1985

Printed in Spain. Impreso en España por GAR. Villablino, 54. Fuenlabrada (Madrid)

A John Eccles
y a Peter Medawar

8. (*100) El origen de la confusión: La «reducción del paquete de ondas» ... 140
9. (*101) La incompletud del formalismo matemático de la teoría cuántica ... 141
10. (*102) Un paseo al azar y la «transición de lo posible a lo real» ... 142
11. (*103) Partículas, ondas y la interpretación propensivista 143
12. (*104) Anticipaciones parciales de la interpretación propensivista ... 148
13. (*105) ¿Existen los saltos cuánticos? ... 153
14. (*106) ¿Existen las partículas? ... 155
15. (*107) Espacio de posición ... 159

CAPITULO III: HACIA UNA RESOLUCION DE LAS PARADOJAS DE LA TEORIA CUANTICA ... 161
16. (*108) ¿Indeterminación o dispersión? ... 161
17. (*109) El experimento de Einstein, Podolsky y Rosen ... 164
18. (*110) El experimento de las dos ranuras ... 168
19. (*111) Una disculpa por haber sido polémico ... 172

UN EPILOGO METAFISICO ... 175
20. (*112) Ideas y programas de investigación metafísicos y la historia de la física ... 176
21. (*113) Cismas, programas y sueños metafísicos ... 188
22. (*114) El determinismo clásico modificado por un argumento de correspondencia ... 192
23. (*115) El indeterminismo y la llamada «reducción del paquete de ondas» ... 197
24. (*116) Sustitución de las películas clásicas por películas propensivistas ... 200
25. (*117) Un modelo aproximado de indeterminismo teórico-cuántico ... 204
26. (*118) Materia y campo ... 205
27. (*119) Problemas abiertos ... 211
28. (*120) Conclusión ... 217

INDICES ... 225

PRINCIPALES PUBLICACIONES Y ABREVIATURAS DE TITULOS

En las *Notas* se han utilizado las siguientes abreviaturas para referirse a las principales publicaciones del autor:

L. d. F.:	*Logik der Forschung,* Julius Spriner Verlag, Viena, 1934.
O.S.:	*The Open Society and Its Enemies,* Princeton University Press, 1950. Traducida como *La sociedad abierta y sus enemigos,* Paidós, Buenos Aires, 1957.
The Poverty:	*The Poverty of Historicism* (1944-1945), 1957, 1960. Traducida como *La miseria del historicismo,* Taurus, Madrid, 1961; Alianza, Madrid, 1973.
L.Sc.D.:	*The Logic of Scientific Discovery,* Hutchinson & Co., Londres; Basic Books, Nueva York, 1959. Traducida como *La lógica de la investigación científica,* Tecnos, Madrid, 1980.
C. & R.:	*Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge,* Routledge and Kegan Paul, Londres; Basic Books, Nueva York, 1963. Traducida como *El desarrollo del conocimiento científico: Conjeturas y refutaciones,* Paidós, Buenos Aires, 1967.
Obj. Kn.:	*Objective Knowledge: An Evolutionary Approach,* Clarendon Press, Oxford, 1972. Traducida como *Conocimiento objetivo: Un enfoque evolucionista,* Tecnos, Madrid, 2.ª ed., 1982.
U.Q.:	*Unended Quest: An Intellectual Autobiography.* Fontana/Collins, Londres, 1976. Traducida como *Búsqueda sin término. Una autobiografía intelectual,* Tecnos, Madrid, 1977.
S. & I.B.:	*The Self and Its Brain,* en colaboración con Sir John Eccles, 1977. Traducida como *El yo y su cerebro,* Labor, Barcelona, 1980.
O.U.:	*The Open Universe: An Argument for Indeterminism.* Vol. II of the *Postscript to the Logic of Scientific Discovery,* Hutchinson, Londres, 1982. Traducida como *El universo abierto. Un argumento en favor del indeterminismo,* Tecnos, 1984.
R. & A. of Sc.:	*Realism and the Aim of Science.* Vol. I of the *Postscript to the Logic of Scientific Discovery,* Hutchinson, Londres, 1983. Próxima traducción como *Realismo y el objetivo de la ciencia,* Tecnos, Madrid.

PROLOGO

1. EL POST SCRIPTUM Y SU HISTORIA

Este libro, Teoría cuántica y el cisma en física, *es el tercer tomo del tan esperado* Post Scriptum a la lógica de la investigación científica *de Sir Karl Popper. Aunque se escribió hace unos veinticinco años, nunca se había publicado. Sin embargo, sigue siendo tan oportuno como cuando se escribió: pone en tela de juicio algunos de los supuestos más fundamentales de la investigación actual de la física y esboza también una nueva cosmología.*

Este tomo se escribió, junto con las demás partes del Post Scriptum *(todas las cuales se publican ahora), principalmente durante los años de 1951 a 1956, en un momento en que* Logik der Forschung, *el primer libro publicado de Popper (1934), estaba siendo traducido al inglés con el título de* The Logic of Scientific Discovery.

Los distintos volúmenes del Post Scriptum *formaban parte, originariamente, de una serie de Apéndices a* La lógica de la investigación científica, *en la que Popper se proponía corregir, extender y desarrollar las ideas de su primer libro. Algunos de esos Apéndices se incluyeron finalmente en* La lógica de la investigación científica, *cuando se publicó en 1959. Pero un grupo de Apéndices adquirió vida propia y se fue convirtiendo, gradualmente, en un trabajo bien integrado y distinto que excedía en longitud al original* Logik der Forschung. *Se decidió publicar esta nueva obra —titulada* Postscript: After Twenty Years *[Post Scriptum: Veinte años después]— como corolario o volumen compañero de* La lógica de la investigación científica *y, en consecuencia, se imprimió en galeradas, en 1956-57.*

Pocos meses antes de la fecha prevista para la publicación, sin embargo, el proyecto se paró en seco. En Búsqueda sin término, *su autobiografía intelectual, Sir Karl dice de esas galeradas: «La corrección de pruebas se convirtió en una pesadilla... Entonces tuve que someterme a una operación en ambos ojos. Después de ella no pude entregarme de nuevo a la corrección de pruebas hasta pasado algún tiempo, y como resultado, el* Post Scriptum *sigue aún sin publicar.»*

Recuerdo claramente aquellos momentos. Fui a Viena a visitar a Popper al hospital poco después de su operación por varios desprendimientos en las dos retinas; y trabajamos sobre el Post Scriptum *mientras él se iba recuperando. Durante mucho tiempo apenas veía y temíamos que se quedase ciego.*

Cuando recobró la vista, trabajó mucho en el Post Scriptum: *aña-*

dió varias secciones e hizo miles de correcciones a las galeradas. Pero la presión del resto de su trabajo se hacía excesiva y después de 1962 apenas se añadió nada al texto. Durante la década siguiente, enormemente productiva, Popper publicó El desarrollo del conocimiento científico: Conjeturas y refutaciones *(1963), y completó y publicó tres libros nuevos:* Conocimiento objetivo: Un enfoque evolucionista *(1972),* Búsqueda sin término *(1974 y 1976), y (con Sir John Eccles)* El yo y su cerebro *(1977), así como numerosos artículos. Esos fueron los años, y las obras, en los que su ahora famosa teoría de la mente objetiva (y de los Mundos 1, 2 y 3) se desarrolló y en los que su enfoque se extendió a las ciencias biológicas.*

Mientras tanto, el Post Scriptum, *que representaba la culminación del trabajo de Sir Karl en la filosofía de la física, seguía sin publicarse. Pero no sin leerse: la mayor parte de los alumnos y colegas más allegados de Popper han estudiado esta obra y, a lo largo de los años, varios han poseído copias de las galeradas. Para los que, como yo, han conocido este libro y han sido profundamente influidos por él, es una gran satisfacción verlo finalmente completo y compartirlo con el gran público.*

El texto que se ha preparado ahora para su publicación es, esencialmente, el que existía en 1962. Excepto en algunos lugares, que se han señalado, no se han hecho alteraciones importantes. Pensamos que éste era el enfoque apropiado para una obra que ha adquirido, a través de su influencia en los alumnos y los colegas de Popper, un carácter histórico —al haber transcurrido unos veinticinco años desde que se redactó y unos cuarenta y cinco desde que se escribió la Logik der Forschung *original. Es obvio que muchos puntos se hubieran expresado hoy de otra forma. Pero una revisión completa por parte del autor habría retrasado indefinidamente la publicación del libro.*

La preparación para la publicación ha consistido en reunir las diferentes versiones de algunas partes del texto que se habían ido acumulando a lo largo de los años; en revisar el libro y en añadir notas bibliográficas y de otra índole para ayudar al lector. Las pocas nuevas adiciones del propio Popper aparecen marcadas claramente: están entre corchetes y marcadas con asterisco. Mis breves notas, bibliográficas y editoriales, aparecen también entre corchetes, seguidas de la abreviatura «Ed.». Aquí he seguido, en general, la práctica establecida por Troels Eggers Hansen, editor de Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie *de Popper (escrita en 1930-32 y publicada en 1979). Popper ha podido comprobar el trabajo editorial en una serie de reuniones que hemos tenido en distintos lugares en los dos años últimos —en Heidelberg, Guelph, Toronto, Washington D.C., Schloss Kronberg y en su casa de Buckinghamshire. Popper ha añadido nuevos prefacios a todos los volúmenes y un nuevo epílogo al segundo.*

Se ha hecho un cambio importante en la presentación, por sugerencia mía. Publicar esta extensa obra en un solo tomo hubiera sido posible, pero hubiera resultado un libro pesado y difícil de manejar, inasequible para muchos estudiantes de filosofía. Algunas partes del Post Scriptum *—incluida* Teoría cuántica y el cisma en física— *tienen un amplio interés no sólo para filósofos y estudiantes de filosofía, sino también para aquellas personas, de entre el gran público, que estén interesadas por la ciencia contemporánea y su interpretación, así como por la cosmología.*

Estas partes son también, en su totalidad, independientes unas de otras. Esto me llevó a sugerir que se publicase la obra en tres tomos independientes del mismo formato, que en conjunto integrasen el Post Scriptum. *Después de algunas dudas, Sir Karl aceptó la propuesta, y también los títulos que yo le sugerí para los tres volúmenes.*

El Post Scriptum *se publica, pues, como sigue:*

— Realismo y el objetivo de la ciencia *(Tomo I).*

— El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo *(Tomo II).*

— Teoría cuántica y el cisma en física *(Tomo III).*

Aunque los tres volúmenes del Post Scriptum *pueden leerse por separado, el lector debe saber que forman un argumento unitario. Cada volumen del* Post Scriptum *ataca uno u otro de los enfoques subjetivistas o idealistas del conocimiento; cada uno estructura un componente o más para un enfoque objetivo y realista del conocimiento.*

Así, en el volumen titulado Realismo y el objetivo de la ciencia, *Popper acosa al «Inductivismo», al que considera como principal fuente del subjetivismo e idealismo, en cuatro planos: lógico, metodológico, epistemológico y metafísico. Popper desarrolla su teoría de la falsabilidad y traza sus efectos, deslindando las opiniones científicas de las no científicas y de las pseudo-científicas. Y presenta su teoría sobre la corroboración como una forma de expresar preferencia racional por una teoría frente a otra sin recurrir a las «certezas» subjetivas o a la «justificación» de las filosofías convencionales. En el primer volumen, Popper trata también su relación con los personajes históricos de la filosofía, tales como Berkeley, Hume, Kant, Mach y Russell, que han hecho contribuciones importantes a la tradición subjetivista; y da respuestas detalladas a críticos filósofos y científicos contemporáneos. En este volumen, Popper ataca también la interpretación subjetiva del cálculo de probabilidades, una interpretación que tiene sus raíces en la creencia de que la probabilidad mide un estado subjetivo de conocimiento insuficiente. En* La lógica de la investigación científica, *Popper defendía una interpretación objetiva del cálculo de probabilidades, para lo que utilizaba la interpretación frecuencial. Ahora Popper critica también la interpretación frecuencial. En su lugar, presenta con todo detalle su propia interpretación propensivista*

—una interpretación que, durante los últimos veinte años, ha encontrado muchos defensores. Estas ideas y estos argumentos se aplican y se desarrollan en los volúmenes restantes.

En El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo, *Popper presenta la crítica tanto de la forma «científica» como de la forma metafísica del determinismo y arguye que la física clásica, al contrario de lo que normalmente se cree, no presupone ni implica determinismo más de lo que lo implica la física cuántica. Y, sin embargo, encuentra que el determinismo metafísico continúa subyacente en la obra de muchos teóricos cuánticos contemporáneos, incluidos los oponentes del determinismo. Popper encuentra el origen del papel que siguen jugando dentro de la física las interpretaciones subjetivas de la probabilidd en esas presuposiciones metafísicas deterministas.*

Hay una profunda conexión entre los argumentos de los tomos primero y segundo, en la preocupación que muestran por la libertad, la creatividad y la racionalidad del hombre.

El primer tomo, en su consideración de la justificación y de la racionalidad, rebate una pretensión subjetivista y escéptica sobre los límites de la crítica —y con ello, sobre los límites de la racionalidad. Si existiera ese límite, sería inútil el debate serio; y su apariencia sería ilusoria.

El segundo tomo, en su tratamiento del determinismo, defiende la idea de que nuestra racionalidad está limitada con respecto a la predicción del aumento futuro del conocimiento humano. Si tal límite no *existiera, entonces sería inútil el debate serio; y su apariencia sería ilusoria.*

Popper mantiene, pues, que la razón humana no tiene límites con respecto a la crítica y, sin embargo, los tiene con respecto a su capacidad de predicción; y demuestra que la falta de limitación en un caso, y la limitación en el otro, son absolutamente necesarias para la existencia de la racionalidad humana.

2. *ESTE TOMO DEL POST SCRIPTUM*

El Post Scriptum *en su totalidad y* Teoría cuántica y el cisma en física, *en particular, son profundamente cosmológicos. Este volumen final es donde el tema básico de la filosofía de Karl Popper —que algo puede proceder de nada— obtiene su fundamento físico.*

No es sorprendente que una idea así encuentre incomprensión y una obstinada resistencia, porque se opone al lema dominante de nuestra tradición filosófica[1]*:*

[1] Véase W. W. Bartley, III, «The Philosophy of Karl Popper. Part II. Conscious-

No hay nada nuevo bajo el sol.
Nada puede ser creado ni destruido.
Ex nihilo nihil fit.

Las principales ideas de la filosofía de Popper y los temas de fondo de los tres tomos del Post Scriptum *están relacionados con el tema fundamental de que algo puede proceder de nada. Las teorías científicas introducen nuevas formas en el universo y no pueden ser reducidas a observaciones: no existe la inducción científica. El futuro no está contenido en el presente ni en el pasado. Hay indeterminismo en la física; y hay indeterminismo en la historia,* ipso facto, *y también porque las nuevas ideas científicas afectan a la historia y, por tanto, al curso del universo físico. Hay auténtica emergencia en biología. Los valores no pueden reducirse a hechos. La mente no puede reducirse a materia. Los niveles descriptivo y argumentativo del lenguaje no pueden reducirse a los niveles expresivo y señalizador. La conciencia es la avanzadilla de la evolución y los productos de la conciencia no están determinados. De ahí la importancia de la «sociedad abierta» en el «universo abierto».*

Es notable que un filósofo para quien la conciencia y sus productos son tan importantes tenga, en el núcleo de su obra filosófica, una denuncia de los intentos —hechos por la mayoría de los mejores filósofos de los últimos cincuenta años— de introducir la conciencia en el corazón de la física.

Ningún conocedor de las ironías de la historia intelectual y del debate erudito puede, pues, dejar de apreciar el raro placer que le espera en este libro, en el que Popper dirige su ataque precisamente al centro del debate actual en la física cuántica. En un momento en que la mayoría de los físicos serios son inductivistas, subjetivistas, positivistas, instrumentalistas —y en un momento en que están tratando de basar esas posiciones en la física— Popper propone una interpretación de la física y, en realidad, de toda la cosmología, que es deductivista, realista, antipositivista, antiinstrumentalista. Es difícil imaginar una forma más rigurosa de contrastar las ideas de un filósofo como Popper, que la de hacerle vivir en medio de esta generación de físicos. Durante los últimos cincuenta años, la necesidad de forjar sus ideas, de contrastarlas y darles forma, para enfrentarse a las objeciones reales y potenciales de los más abstractos teóricos de las más esotéricas ciencias modernas, ha ayudado a dar a las ideas de Popper su lapidaria claridad.

También les da una importancia científica y una significación cultural que no es típica del pensamiento filosófico contemporáneo.

El Editor quiere expresar su gratitud a The American Council of

---

ness and Physics: Quantum Mechanics, Probability, Indeterminism, The Body-Mind Problem», *Philosophia 7,* 3-4, julio 1978, pp. 675-716.

Learned Societies y a la American Philosophical Society por el generoso apoyo prestado a su trabajo editorial en estos volúmenes; y a los profesores Donald T. Campbell y F. A. von Hayek por sus consejos y su apoyo. También desea agradecer a su secretaria, Nancy Artis Sadoyama, su dedicación e incansable ayuda.

W. W. BARTLEY III

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a mi colega John W. N. Watkins el ánimo que me ha dado con su constante interés. Ha leído este volumen en manuscrito y en galerada y ha hecho sugerencias muy útiles para mejorarlo. Fue por sugerencia suya por lo que decidí publicar el *Post Scriptum* como una obra aparte, en lugar de como había pensado originariamente, como una serie de Apéndices a *La lógica de la investigación científica.* Pero, aún más importante para la terminación de la obra, fue el interés que mostró por las ideas que contiene.

Quiero también dar las gracias a los co-traductores de *The Logic of Scientific Discovery,* Dr. Julius Freed y Lan Freed, que leyeron la mayor parte de este volumen en galeradas e hicieron numerosas sugerencias para mejorar el estilo. [Los dos murieron muchos años antes de que se publicara el libro. Ed.]

Joseph Agassi fue, durante el tiempo en que se escribió este libro, primero estudiante de investigación y luego mi ayudante de investigación. Con él discutí casi cada sección, con todo detalle, y con frecuencia, como consecuencia de sus consejos, desarrollé uno o dos enunciados hasta formar una nueva sección completa —o, en un caso, una nueva parte [la Parte II de *Realismo y el objetivo de la ciencia*]. Su cooperación fue para mí de enorme valor.

Quiero dar las gracias también a la London School of Economics and Political Science, que me hizo posible la provechosa ayuda del Dr. Agassi, y al Center for Advanced Study in the Behavioral Sciences (Ford Foundation) en Standfor, California, porque me dio la oportunidad de trabajar ininterrumpidamente, desde octubre de 1956 a julio de 1957, en las galeradas de este libro, y porque hizo posible que el Dr. Agassi me ayudara durante ese tiempo.

PENN, BUCKINGHAMSHIRE, 1959

El profesor W. W. Bartley, III, fue alumno mío y, más tarde, colega en la London School of Economics, de 1958 a 1963, y colaboró estrechamente conmigo en 1960-62, en este libro. En 1978 tuvo la amabilidad de consentir en actuar como editor del *Post Scriptum*. Le estoy muy agradecido por su asistencia y por emprender tan ardua tarea. Le debo más de lo que puedo expresar.

Es también un placer dar las gracias a varias personas más, que, en los años pasados, trabajaron conmigo en este *Post Scriptum,* en particular, Alan E. Musgrave, David Miller, Arne F. Petersen, Tom Settle y Jeremy Shearmur. De ellos, David Miller y Arne Petersen deben ser mencionados especialmente a causa de la enorme cantidad de trabajo que ambos realizaron en varios períodos antes de 1970.

La London School ha continuado ayudándome durante todos estos años, designando un ayudante de investigación. Durante los trece años transcurridos desde mi jubilación, en 1969, lo ha hecho con ayuda de una beca de la Nuffield Foundation, a la que quiero expresar mi agradecimiento. Los principales responsables de esta disposición fueron, mi amigo y sucesor, el profesor John Watkins; el difunto Sir Walter Adams, director de la London School y el director actual, profesor Ralf Dahrendorf, por cuya entrañable amistad e interés por mi trabajo estoy profundamente agradecido.

Si el *Post Scriptum* se hubiera publicado en la década de los cincuenta se lo hubiera dedicado a Bertrand Russell: El profesor Bartley me ha dicho que hay una carta que lo atestigua en los Archivos de Russell en McMaster University.

Debo mencionar, finalmente, que el *Post Scriptum* (junto con la traducción inglesa de *La lógica de la investigación científica)* me parecía casi terminado en 1954. Fue entonces cuando escogí su título original «Postscript: After Twenty Years» [Post Scriptum: Veinte años después], aludiendo a la publicación de *Logik der Forschung,* en 1934.

PENN, BUCKINGHAMSHIRE, 1982

NOTA DEL AUTOR

Este libro lleva en preparación bastante más de treinta años, aunque a menudo ha sido dejado a un lado. Trata sobre filosofía de la física, y la física ha cambiado durante este tiempo (al igual que el autor). En consecuencia, el libro contiene varias partes distintas. Esta nota constituye el intento del autor de guiar al lector a través de ellas.

La parte principal, desde la página 117 hasta el final, permanece igual que estaba en las galeradas de 1957, con unos cuantos cambios estilísticos de poca importancia y con la adición de alguna referencia y nota a pie de página de carácter bibliográfico.

Lo que precede a esta parte principal se llama «Comentarios Introductorios». Contiene varios ensayos escritos en 1980-81 y también uno escrito en 1966 (con una adición de 1981). Todos ellos constituyen diversos intentos de introducir desarrollos posteriores de mis concepciones.

Esos desarrollos son, en parte, simplificaciones de viejas ideas (tales como, especialmente, la sección IX del «Prefacio de 1982»); en parte son reacciones respecto a —o, más exactamente, contra— los cambios de atmósfera en la ortodoxia de la mecánica cuántica, la llamada interpretación de Copenhague. Podrían distinguirse los siguientes períodos:

1927-1932. El período de lo que más tarde llamé la tesis de «el-final-del-camino»: La mecánica cuántica iba a considerarse como la Ultima Revolución en física, puesto que había alcanzado los límites inherentes del conocimiento. Porque éste era el contenido real de las relaciones de indeterminación. (Mi réplica fue: no son nada de eso —son, simplemente, relaciones de dispersión.)

1932-1936. Surgieron algunas dudas con las primeras partículas nuevas (lo que realmente significaba el final del período en el cual la mecánica cuántica podía verse a sí misma como culminación de la teoría electromagnética de la materia). Einstein vio claramente lo absurdo de la pretensión de que la mecánica cuántica era el final —que era «completa». Esto llevó al EPR (el artículo de Einstein, Podolsky y Rosen), y a la réplica de Bohr, que insiste en la completud de la teoría cuántica.

1936-1948. La tesis del final-del-camino fue abandonada por Pauli. Bohr persistió en su réplica a EPR. Einstein propuso (en un corto artículo en *Dialéctica,* 1948) la tesis de que la mecánica cuántica entraña acción a distancia, pero esta tesis pasó desapercibida.

1948-1964. Nuevos descubrimientos experimentales (que no se co-

rrespondían del todo con las tendencias teóricas) acabaron con la tesis del final-del-camino. David Bohm reformuló el EPR que, por lo demás, quedó bastante olvidado.

1964-1981. J. S. Bell reformula el experimento de EPR a la luz del descubrimiento de Einstein de que la mecánica cuántica implica acción a distancia. Nuevos experimentos, especialmente los de Aspect, parecen confirmar la existencia de la acción a distancia.

Mi propia reacción ante esto: no estoy del todo convencido de que los experimentos se hayan interpretado correctamente; pero, en caso afirmativo, tendremos que aceptar la acción a distancia. Creo (con J.-P. Vigier) que ello sería, desde luego, muy importante, pero no creo, de ningún modo, que debilitase el realismo, ni siquiera creo que le afectase. Newton y Lorenz eran realistas y aceptaron la acción a distancia; y el de Aspect sería el primer experimento crucial entre la interpretación de Lorenz y la interpretación de Einstein de las transformaciones de Lorenz.

Realismo es el mensaje de este libro. Está vinculado con la objetividad, también en la teoría de la probabilidad. Este vínculo da lugar a la interpretación propensivista. El realismo está vinculado con el racionalismo, con la realidad de la mente humana, de la creatividad y del sufrimiento humanos.

COMENTARIOS INTRODUCTORIOS

PREFACIO DE 1982:

SOBRE UNA INTERPRETACION REALISTA Y DE SENTIDO COMUN DE LA TEORIA CUANTICA

La gran tarea de las ciencias naturales y de la filosofía natural es ofrecer una imagen coherente e inteligible del Universo. Toda ciencia es cosmología y todas las civilizaciones de las que tenemos conocimeinto han tratado de entender el mundo en que vivimos, incluyéndonos a nosotros mismos y a nuestro conocimiento como partes de ese mundo.

En este intento de entender el mundo, la ciencia física, con su maravillosa combinación de creatividad especulativa y de apertura a la experiencia, ha adquirido una importancia fundamental. Esto no fue siempre así, y puede no seguir siéndolo en el futuro. Pero en la actualidad, parece como si nuestro mundo hubiera sido un mundo de física mucho antes de que emergiera un mundo de química y mucho antes aún de que emergiera un mundo de biología.

Hoy, la física está en crisis. La teoría física tiene un éxito increíble; produce constantemente nuevos problemas y resuelve tanto los viejos como los nuevos. Y parte de la crisis actual —la casi permanente revolución de sus teorías fundamentales— es, en mi opinión, el estado normal de cualquier ciencia madura. Pero la crisis actual tiene otro aspecto: es también una crisis de comprensión.

Esta crisis de nuestra comprensión es aproximadamente tan antigua como la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. Es, pues, un poco más antigua que la edición original de *La lógica de la investigación científica*. En esta parte del *Post Scriptum* he tratado de hacer de nuevo una serie de proposiciones con la intención de clarificar lo que hay bajo esta crisis de entendimiento.

I

En mi opinión, la crisis se debe, esencialmente, a dos cosas: *a)* la intrusión del subjetivismo en la física, y *b)* la victoria de la idea de que la teoría cuántica ha alcanzado la verdad total y final.

El origen del subjetivismo en física puede buscarse en varios grandes errores. Uno es el positivismo o idealismo de Mach. Se extendió a las islas Británicas (donde Berkeley lo había creado) a través de Russell, y a Alemania a través del joven Einstein (1905). Einstein rechazó

esta concepción cuando tenía alrededor de cuarenta años (1926), y lo lamentó profundamente en su edad madura (1950)[1]. Otro de los errores es la interpretación subjetivista del cálculo de probabilidades, que es mucho más antigua y que se convirtió en dogma central de la teoría de la probabilidad a través de la obra de Laplace.

La cuestión central aquí es el *realismo*. Es decir, la realidad del mundo físico en que vivimos: el hecho de que este mundo existe con independencia de nosotros; que existió antes de que existiese la vida, según nuestras mejores hipótesis; y que continuará existiendo, por lo que sabemos, mucho después de que todos nosotros hayamos desaparecido.

He argüido en favor del realismo en varios lugares[2]. Mis argumentos son en parte racionales, en parte *ad hominem* y en parte, incluso, éticos. Me parece que el ataque al realismo, aunque intelectualmente interesante e importante, es bastante inaceptable, sobre todo después de dos guerras mundiales y del sufrimiento real —sufrimiento evitable— que produjeron inexcusablemente; y me parece que cualquier argumento contra el realismo que se base en la moderna teoría atómica —en la mecánica cuántica— debe ser silenciado por el recuerdo de la realidad de los acontecimientos de Hiroshima y Nagasaki. (Digo esto lleno de admiración por la teoría atómica y por la mecánica cuántica modernas y por los científicos que han trabajado y trabajan en ese campo.)

El realismo fue puesto en tela de juicio por primera vez por el escepticismo, sobre todo, por ciertos argumentos de Descartes que, para sacar el mejor partido del escepticismo, trató de extraer de él las más radicales y, de hecho, absurdas, conclusiones.

Después, lo puso en duda el obispo Berkeley, que, igual que el cardenal Bellarmino, temía que la ciencia, si se tomaba en serio, acabase desalojando al cristianismo[3].

Así surgió una filosofía idealista (o incluso positivista[4]), una filosofía que considera nuestras experiencias subjetivas —especialmente nuestras percepciones, nuestras observaciones— más seguras, más ciertamente reales, que la realidad física, que, alega el positivismo, es meramente una construcción nuestra. Sin embargo, se pueden ver esas cuestiones desde un punto de vista diferente. Podemos considerar nues-

---

[1] Las fechas son las del primer artículo de Einstein sobre la relatividad especial, la de una visita de Heisenberg a Einstein en Berlín y la de mi visita a Einstein en Princeton.

[2] Véase *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.)*, sección 6 del capítulo 3 (escrito en 1954 y publicado por primera vez en 1956); y *Conocimiento objetivo (Obj. Kn.)*, capítulo 2, sobre todo, sección 5.

[3] Véase *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.)*, capítulo 3, secciones 1 y 2.

[4] Véase *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.)*, capítulo 6.

tras construcciones mentales como útiles para la tarea de ayudarnos a sobrevivir en un mundo real que sigue siéndonos en gran medida desconocido.

Debemos a Kant la primera gran tentativa de combinar una interpretación realista de la ciencia natural con la percepción de que nuestras teorías científicas no son simplemente el resultado de una descripción de la naturaleza —de «leer el libro de la naturaleza» sin «prejuicios»—, sino que, más bien, son productos de la mente humana: «Nuestro intelecto no toma sus leyes de la naturaleza, sino que impone sus leyes a la naturaleza» [5]. He intentado perfeccionar esta excelente formulación de Kant como sigue: «Nuestro intelecto no toma sus leyes de la naturaleza, sino que trata —con éxito desigual— de imponer sobre la naturaleza leyes que él inventa libremente» [6].

Así pues, las teorías son invenciones nuestras: esto lo han visto claramente los idealistas epistemológicos. Pero algunas de esas teorías son tan arriesgadas que pueden chocar con la realidad: son las teorías contrastables de la ciencia. Y cuando chocan, entonces sabemos que hay una realidad: algo que puede informarnos de que nuestras ideas son erróneas. Y, por eso, el realista tiene razón [7].

(Por cierto, este tipo de información —el rechazo de nuestras teorías por la realidad— es, en mi opinión, la única información que podemos obtener de la realidad misma: todo lo demás es creación nuestra. Esto explica por qué todas nuestras teorías están coloreadas por nuestro punto de vista humano, pero cada vez menos deformadas por él a medida que continúa nuestra búsqueda.)

Eso, en cuanto al realismo —al «realismo científico», al «realismo crítico».

La concepción errónea de que el «realismo científico» entraña que nuestras teorías científicas tengan que basarse en lo que podamos observar realmente, es decir, en la información, en los «datos» que nos dé la realidad —una concepción claramente rechazada por Einstein en 1933 [8], aunque sigue siendo popular, incluso entre los físicos teóricos— ha llevado, con tanta frecuencia como antes, a la intrusión de una interpretación de la ciencia subjetivista o positivista o idealista o solipsista.

---

[5] Kant, *Prolegomena,* final de la sección 37.

[6] *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.),* cap. 8, p. 191.

[7] Compárese con este párrafo *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.),* p. 117, segundo párrafo nuevo (capítulo 3, sección 6).

[8] Véase Einstein, *On the Method of Theoretical Physics* (The Herbert Spencer Lecture), Oxford, 1933.

II

La segunda fuente de intrusión del subjetivismo está relacionada con el surgimiento de la *física probabilista* que adquirió importancia fundamental para la teoría de la materia con Maxwell y Bolzmann, que, naturalmente, tenían muchos predecesores distinguidos.

Durante mucho tiempo se consideró que esta nueva física probabilista estaba ligada a nuestra *falta de conocimiento*[9]. Incluso durante la década de 1930, y quizá después, seguía pensándose que las consideraciones probabilistas entran en la física sólo porque no podemos saber de ninguna manera las posiciones y los momentos precisos de todas las moléculas de un gas. Esto nos obliga a atribuir probabilidades a las diversas posibilidades; un método que es la base de la mecánica estadística. Si supiéramos, si pudiéramos estar seguros de todas las posiciones y los momentos de las partículas en cuestión, no tendríamos que recurrir a las probabilidades.

Así, se forjó un vínculo entre la falta de conocimiento por un lado y la física estadística o probabilista por otro. Este vínculo era una premisa bastante universal entre los científicos hasta, digamos, 1939, e incluso después. Einstein, por ejemplo, la defendió contra mi *Lógica de la investigación científica (L.I.C.),* donde yo la había criticado (pero abandonó la defensa durante una discusión en 1950)[10].

Puede mostrarse que esta concepción del papel que jugaba nuestra falta subjetiva de conocimiento, o nuestra incertidumbre, era de capital importancia, al menos, en las primeras interpretaciones de Heisenberg de aquellas fórmulas que él llamó «relaciones de incertidumbre» y que, pensaba él, *explicaban* por qué la mecánica cuántica tenía un carácter estadístico. (Compárese con esto *L.I.C.,* especialmente la sección 75.)

Yo creo que no cabe la menor duda de que, históricamente, estos dos puntos explican la intrusión del subjetivismo en la física. Juntos, llevaron a un rechazo, positivista o idealista o subjetivista, del realismo, motivado por la creencia de que *una física fundamental e irreduciblemente estadística tenía que explicarse como causada por una li-*

[9] Véase Bryce S. DeWitt, «Quantum mechanics and reality», en Bryce S. DeWitt y Neill Graham, *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics,* Princeton, 1973, pp. 160-61.

[10] Usé dos argumentos que le convencieron en seguida. Uno era que incluso aunque conociéramos todo, seguiríamos teniendo que derivar *información estadística* de ese conocimiento para resolver lo que son problemas esencialmente estadísticos, tales como la explicación de la presión de un gas o la intensidad de las rayas del espectro. (Esto puede verse también por la forma que tenemos de obtener información estadística a partir de cuestionarios.) El segundo argumento, muy relacionado con el primero, era el argumento lógico más general de que necesitamos premisas estadísticas o probabilísticas (una teoría estadística o probabilística) para derivar conclusiones estadísticas.

mitación fundamental e irreducible de nuestro conocimiento (subjetivo) —una limitación (las relaciones de incertidumbre), que es, a su vez, objetiva, desde luego, pero de todas formas, una limitación a lo que puede conocer un sujeto.

Debe admitirse que la creencia en la objetividad de esta limitación llevó, con el tiempo, a un cambio: el papel que jugaba la probabilidad se veía ahora de una manera diferente. Así, la física cuántica empezó a ser considerada como objetivamente indeterminista y la probabilidad como algo objetivo (como yo había sostenido en *L.I.C.)*.

Pero mi conjetura histórica es que, para entonces, el dogma subjetivista estaba demasiado profundamente arraigado en la interpretación dominante de la mecánica cuántica, la llamada interpretación de Copenhague; y que incluso las ocasionales alusiones de Heisenberg a las posibilidades objetivas (con lo que se refería a algo muy similar a mis propensiones), no eliminaban al sujeto —al observador— de la interpretación de Copenhague; ni tampoco pretendían hacerlo.

He esbozado aquí esta historia, brevemente, porque explica, en parte, cómo empezó el gran embrollo cuántico: por qué las llamadas «relaciones de incertidumbre» de Heisenberg fueros interpretadas, al menos durante mucho tiempo, como límites a nuestro conocimiento subjetivo (en lugar de interpretarse como esas «relaciones de dispersión» objetivas y estadísticas con las que yo sugerí sustituir la interpretación de Heisenberg en *L.I.C.*, ya en 1934); y por qué, cuando se destacó su lado objetivo, siguieron interpretándose como enunciados sobre la imposibilidad de ciertas mediciones *debido a la inexistencia de las entidades medidas* —en lugar de interpretarse como enunciados sobre la imposibilidad de producir estados cuánticos exentos de dispersión.

Y toda la terminología, introducida en el primer período de la teoría, conspiró para enredar el embrollo cada vez más.

III

Otra fuente de la crisis actual de la física es la persistencia de la creencia de que la mecánica cuántica es final y completa. Y la razón más fuerte de mi propia oposición a la interpretación de Copenhague está en su pretensión de finalidad y de completud.

La interpretación de Copenhague —o, más exactamente, la concepción de la condición de la mecánica cuántica que defendían Bohr y Heisenberg— era, simplemente, que la mecánica cuántica era la última revolución de la física, la final, la que nunca sería superada; junto con la tesis de que la verdad *sobre* la situación de la física puede establecerse por medio de argumentos basados en la propia física: más concretamente, basados en las relaciones de incertidumbre o indeter-

minación de Heisenberg. Se pretendía que esas relaciones mostraban que *la física había llegado al final del camino;* que ya no era posible descubrir nada más, aunque, naturalmente, quedaba mucho por hacer por medio de la elaboración y aplicación de la nueva mecánica cuántica: en otras palabras, por medio de la «ciencia normal» en contraste con la ciencia revolucionaria.

Apenas necesito decir que en 1930, como hoy, yo consideraba la revolución científica como típica de *toda* gran ciencia. Yo admiraba muchísimo a Bohr y a Heisenberg como científicos revolucionarios. Pero consideraba su pretensión epistemológica, y sigo considerándola, una extravagancia.

Es una pretensión que también otros consideraron extravagante. Es una pretensión que puede que, ahora ya, esté olvidada.

Creo que, efectivamente, está olvidada: nadie la menciona ya, a pesar de que es fundamental para la discusión actual de la teoría cuántica (sobre todo, desde que J. S. Bell hizo posible que se investigara experimentalmente).

Esbocemos la historia brevemente.

Einstein y otros que apreciaban la mecánica cuántica como un descubrimiento revolucionario, pero que no aceptaban su finalidad, o lo que me propongo llamar la «tesis del final-del camino», pensaban que tenía que haber otro nivel más profundo en física, un nivel más allá de la mecánica cuántica.

Einstein basó su opinión durante mucho tiempo en el argumento (erróneo, en mi opinión) de que la mecánica cuántica es una teoría probabilista y que la probabilidad tiene cabida en la física sólo a causa de nuestra falta de conocimiento (véase la sección anterior).

Siempre he considerado equivocada esta concepción subjetivista de la probabilidad, y creo que Einstein la abandonó —quizá definitivamente— durante nuestra discusión, en 1950. Pero incluso aquellos que no estaban de acuerdo con Einstein respecto a esta razón concreta para rechazar la tesis del final-del-camino, convenían en que podía haber una capa más profunda de realidad física, más allá de la descrita por las ecuaciones de la mecánica cuántica —quizá en la física nuclear. Después de todo, la mecánica cuántica se había desarrollado, esencialmente, como la teoría de las capas electrónicas que rodean el núcleo atómico.

Pero ésta no era, desde luego, la perspectiva de Heisenberg. Pasé una tarde con él (creo que en 1935) cuando vino a Viena. Entonces sugirió que *no* se profundizaría más en la mecánica cuántica con la investigación del núcleo. Predijo, más bien, que la situación que prevalece en el núcleo podía empeorar la indeterminación: podía resultar que los límites a nuestro conocimiento en la teoría nuclear fueran incluso más severos que los de la teoría atómica (la teoría de la capa electrónica) y que estuviéramos incapacitados para siempre para en-

tender el funcionamiento y la estabilidad del núcleo y no pudiéramos ni siquiera entenderlo en la misma medida en que entendemos el funcionamiento y la estabilidad de las capas electrónicas.

Hoy es bastante obvio que aquéllos que no creyeron en la tesis del final-del-camino tenían razón. El propio Heisenberg contribuyó a superarla. En realidad, la tesis parece hoy tan absurda que supongo que pocos físicos creerán que se sostuvo alguna vez, o, si se sostuvo, que fue tomada en serio.

Sin embargo, esta tesis del final-del-camino fue la razón del gran encontronazo entre los titanes, de las discusiones entre Albert Einstein y Niels Bohr.

Es comúnmente aceptado que Einstein fue derrotado en esta batalla. (Véase más adelante, la «Introducción».) Pero la verdad es muy distinta. La cuestión real entre Einstein y Bohr era lo que ambos llamaban, de una forma algo vaga y confusa, *el problema de si la teoría cuántica era completa o no.*

El término «completa» se usó en varios sentidos en esa discusión, pero fundamentalmente, y al principio de ella, el término se usaba para ayudar a formular *el problema de si la mecánica cuántica era o no (al menos en principio) el final del camino en física.*

Es importante recordar, en relación con esto, que Einstein nunca consideró ninguna de sus propias revoluciones como un descubrimiento *final.* Su propia teoría del fotón, y la necesidad de usarla junto a la teoría ondulatoria de la luz, que estableció realmente lo que más tarde se llamó la dualidad onda-partícula, él la consideraba como un recurso momentáneo, aunque le llevó casi al umbral de la teoría de ondas de materia; es decir, a la extensión de la dualidad partícula-onda de la teoría de la luz a la teoría de la materia. También consideraba su teoría de la relatividad especial, insatisfactoria, con razón (por varios motivos, sobre todo, porque se reducía a sustituir el espacio absoluto por el conjunto absoluto de los sistemas inerciales). De su teoría general decía que era «efímera»; y desde el momento en que la concibió hasta el fin de su vida, intentó sustituirla.

Con Heisenberg y Bohr fue distinto. El descubrimiento de Heisenberg, que fue acompañado por una experiencia de la visión intuitiva de la nueva teoría, le causó una tremenda impresión. Como él mismo dice «el criterio más importante de la verdad» es la visión intuitiva de la simplicidad de la solución que «en el momento final» lo ilumina todo [11].

Creo que esta gran experiencia, la visión de una «simplicidad que ilumina» fue decisiva para la actitud de Heisenberg. Le hizo sentir que «*esto* era lo que buscaba»: era el final del camino, la verdad final. Y le hizo reprochar a otros —sobre todo a Einstein— que no vie-

[11] Werner Heisenberg, *Der Teil und das Ganze,* p. 138.

ran que era efectivamente el final del camino en física. Usó la palabra alemana «*endgültig*». Pero la traducción inglesa «finally valid», finalmente válida, no logra expresar la sensación de haber alcanzado la solución final que expresa el término alemán «*endgültig*». Fue al tratar de expresar esa sensación cuando di con la frase «final del camino».

Así, en su Prefacio a la correspondencia entre Einstein y Bohr (escrito probablemente en 1968), Heisenberg trata de describir la situación que les separaba a él y a su maestro, Max Born, de Einstein. Dice que «Einstein estaba de acuerdo con Born en que el... formalismo matemático de la teoría cuántica representaba correctamente los fenómenos de las capas [electrónicas] del átomo». Pero se queja de que «Einstein no quería reconocer que la mecánica cuántica representaba una descripción finalmente válida de esos fenómenos y, menos aún, que representaba una descripción completa» [12]. Aquí, finalmente válida («finally valid, *endgültig*») debería, creo, traducirse como «ultimately valid», definitivamente válida —en realidad por el «final del camino».

Cuando escribió esto, Heisenberg apenas recordaba que la actitud de Einstein hacia sus propias teorías había sido mucho más crítica que su actitud hacia las de Heisenberg.

Un comentario similar sobre el conflicto puede encontrarse en el volumen conmemorativo *Werner Heisenberg* [13]. Aquí, C. F. von Weizsäcker, un íntimo amigo y colaborador de Heisenberg, escribe (p. 66) que Einstein pensaba que la mecánica cuántica no era todavía «*die endgültige Physik*» (la física definitivamente válida, el final del camino en la ciencia física). La actitud crítica de Einstein, así descrita, se toma como una señal de su insuficiente comprensión, como señal de que era anticuado y se había quedado atrasado, lo que le llevaba a perder el contacto con la mecánica cuántica.

Antes de dejar a Heisenberg y su muy comprensible actitud, quizá deba mencionar que sus concepciones cambiaron mucho. Fue él quien indujo a una generación de físicos a aceptar la absurda concepción de que de la mecánica cuántica se aprende que «la realidad objetiva se ha esfumado» [14].

El caso de Niels Bohr es algo diferente.

Cuando, gracias a Victor Weisskopf, tuve, en 1936, la gran oportunidad de hablar por primera vez con Bohr, me causó la impresión

---

[12] Véase *Albert Einstein-Hedwig und Max Born: Briefwechsel: 1916-1955*, Munich, 1969, o *The Born-Einstein Letters*, Nueva York, 1971, pp. ix-x.

[13] Carl Friedrich von Weizsäcker y Bartel Leendert van der Waerden, *Werner Heisenberg*, Munich, 1977. Véase también C. F. von Weizsäcker, «Gedenkworte für Werner Heisenberg» en *Orden Pour le Mérite für Wissenschaften und Künste: Reden und Gedenkworte*, Heidelberg, 1976, pp. 63-81.

[14] *Daedalus* 87, 1958, pp. 95-108.

de ser la persona más admirable que había conocido y que probablemente conocería jamás. Era todo lo que puede ser un gran hombre y un hombre bueno. Y era irresistible. Pensé que debía de estar equivocado yo respecto a la mecánica cuántica, a pesar de que no podía decir que la entendiera ahora, racionalmente, en el sentido de Bohr: no la entendía. Pero estaba abrumado.

La actitud de Bohr, creo yo, era muy distinta de la de Heisenberg. Yo creo que Bohr era, básicamente, realista. Pero la mecánica cuántica había sido, desde el principio mismo, un enigma para él: nadie podía haber sido más plenamente consciente de la profundidad de las dificultades que acosaban a su modelo atómico de 1913. Nunca se libró de esas dificultades. En todos sus magníficos éxitos siempre había encerrado algún fracaso: algo incomprensible, impenetrable, le impedía alcanzar la claridad. Quizá nunca experimentó aquella satisfacción que Heisenberg había experimentado, aquella ráfaga cegadora de luz que lo iluminaba todo. Cuando Bohr aceptó la mecánica cuántica como el final del camino, fue, en parte, por desesperación: sólo la física clásica era inteligible, sólo ella era una descripción de la realidad. La mecánica cuántica no era una descripción de la realidad. Era imposible conseguir una descripción así en la región atómica; aparentemente porque no existía esa realidad: la realidad inteligible terminaba donde terminaba la física clásica. Lo más cercano a la comprensión de los átomos era su propio principio de complementariedad.

Este principio nos decía algo sobre los límites de la física clásica y, por tanto, del entendimiento. Podíamos entender las partículas clásicas y podíamos entender las ondas clásicas y podíamos entender que la descripción de las partículas y la de las ondas eran incompatibles. Eran incompatibles pero ambas eran necesarias. Ese era el límite de lo que nuestro entendimiento podía penetrar. Era el final del camino —pero en un sentido bastante distinto del de Heisenberg, aunque los dos estaban de acuerdo en que era necesario un acto de «renuncia» de nuestro entendimiento.

La conexión que hizo Bohr del «principio de complementariedad» con el «dualismo de partícula y onda» se vino abajo cuando se aceptó la interpretación de Born del cuadrado de la amplitud de onda como una probabilidad para hallar la partícula. Porque esto significaba, en realidad, la aceptación de que la interpretación corpuscular era básica. (Sobre la relación entre la dualidad onda-partícula y las relaciones de Heisenberg, véase la nota 38a de la Introducción, más adelante.) Desde aquel momento, el caos imperó en el campo de Copenhague. (Por ejemplo, un gran físico y matemático como Pascual Jordan podía hacer afirmaciones como las expuestas en *L.I.C.*, pp. 423-425.) Murray Gell-Mann, uno de los poquísimos físicos que se atreve a criticar a Bohr, lo expresa quizá con excesiva dureza cuando dice que «Niels

Bohr hizo un lavado de cerebro a toda una generación de teóricos para que pensaran que el trabajo» (es decir, una presentación filosóficamente adecuada de la mecánica cuántica) «se había hecho cincuenta años antes» [15]. Yo más bien creo que la mayoría de los físicos, incluidos los teóricos, no se tomaron mucho interés y simplemente confiaron en Bohr en una cuestión para la que no se sentían competentes.

Bohr también apoyó la tesis del final-del-camino, casi totalmente olvidada hoy, que era el núcleo mismo de su gran lucha con Einstein. Que ése era el problema, al menos en aquellos días, puede verse claramente en el famoso artículo de Einstein, Podolsky y Rosen (1935) [16].

IV

Pero antes de esto, ya en 1932, John von Neumann publicó su *Die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik* —un libro muy, muy difícil (por lo menos para mí) [17]. En este libro, von Neumann presentaba una prueba matemática que trataba de establecer, de una vez por todas, el carácter definitivo, de final-del-camino, de la mecánica cuántica: demostraba que estaban equivocados todos aquellos que, como Einstein, pensaban que podía haber una capa de realidad física más profunda que la representada por la mecánica cuántica.

Para que su demostración fuese bastante general, von Neumann introdujo un concepto que se hizo muy famoso: el concepto de las «variables ocultas». Una «variable oculta» era cualquier cosa que tuviese que ser tomada en cuenta en la teoría atómica (en el mismo sentido en el que la teoría atómica incluía el núcleo como cosa normal) y que todavía no fuese tenida en cuenta por la mecánica cuántica. Von Neumann demostró (o eso nos dijeron) que esas variables ocultas no podían existir en la mecánica cuántica; o, según una interpretación ligeramente distinta, demostró que la existencia de variables ocultas contradecía a la mecánica cuántica.

Ahora bien, resulta que el mismo año en que se publicó el libro de von Neumann, se descubrieron dos nuevas partículas: el neutrón y el positrón.

---

[15] M. Gell-Mann en Douglas Huff y Omer Prewett, *The Nature of the Physical Universe: 1976 Nobel Conference,* Nueva York, 1979, p. 29.

[16] A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review,* 47, 1935, pp. 777-780.

[17] Respecto a la prueba de von Neumann sobre la imposibilidad de las variables ocultas, no pude encontrar ningún argumento convincente en ella que no fuera el de la exclusión de los efectos exentos de dispersión.

¿No eran ésas variables (anteriormente) ocultas? Y, si no, ¿qué habían sido?

La mecánica cuántica no era, después de todo, un formalismo físico abstracto, sino una teoría sobre algo muy concreto: una teoría de los átomos, una teoría de su estructura, considerada como dotada de un núcleo de carga positiva y una estructura cortical de electrones negativos que explicaba, en principio, unas propiedades muy concretas de los elementos químicos.

En 1931 se suponía todavía que esas estructuras constaban de dos partículas materiales solamente —el electrón y el protón—; además de, naturalmente, una partícula no material, el fotón. Todas las estructuras atómicas tendrían que explicarse en esos términos; y los núcleos se compondrían de ellas de una manera desconocida (y tal vez imposible de conocer).

Entonces, en 1932, se descubrieron el positrón y el neutrón; y en 1933, Pauli anunció en la conferencia de Solvay, en Bruselas, su atrevida idea de la existencia de otra partícula para la que Fermi sugirió el nombre de «neutrino».

Tiene cierto interés exponer brevemente las razones que impidieron a los principales físicos darse cuenta de que esas partículas refutaban la afirmación de que la mecánica cuántica, tal como la formulaba, por ejemplo, von Neumann, había sido el final del camino en física *(endgültig)* y que era completa *(vollständig)*.

a) El positrón. Se ha afirmado, y la afirmación es digna de crédito, que el descubrimiento del positrón por Anderson fue recibido al principio de muy mala gana por Bohr, Heisenberg, Schrödinger y también por Eddington. Sin embargo, cuando resultó evidente que no podía rechazarse ese descubrimiento, fue saludado, yo creo que correctamente, como un éxito para la mecánica cuántica, en la forma que Dirac le había dado. Porque Dirac había obtenido, en efecto, de su teoría, la predicción de la existencia de una partícula de carga positiva. El había supuesto que esto hacía referencia al protón, pero encajaba mucho mejor con el positrón. De forma que había razones bastante buenas para decir que el positrón, lejos de ser una refutación, era una confirmación de la mecánica cuántica [18].

b) El neutrón de Chadwick era quizá menos problemático: podía interpretarse, y se hizo, al principio, como compuesto de un protón y un electrón. Resultó, sin embargo, que había en ello una dificultad seria: la teoría —la mecánica cuántica— no conseguía explicar con éxito esa composición. Así que, con el tiempo, acabó por acep-

[18] Naturalmente, ésta no es, ni mucho menos, toda la historia. Para un relato más completo, véase Norwood Russell Hanson, *The Concept of the Positron*, Cambridge, 1963, especialmente pp. 143-158. Esas páginas deberían ser leídas por todos los interesados en esta historia.

tarse como una nueva partícula, que puede surgir o bien de la transición común de un protón y un electrón a neutrón o por la emisión de un positrón desde un protón. (Es interesante leer en un artículo reciente de Ruggero Maria Santilli que, en su propia teoría, está reviviendo este «primer modelo de la estructura del neutrón», «resolviendo las dificultades técnicas que [habían] llevado, históricamente, al abandono del modelo» [19].

Esas dificultades —dice Santilli—, se debían, *todas ellas,* a la suposición de que la mecánica atómica [como llama Santilli a la mecánica cuántica] era aplicable dentro del neutrón, y desaparecen cuando se usa una mecánica generalizada.

c) Es comprensible que, de esta manera, los del final-del-camino (entre los que se contaba Pauli en aquel momento) no se extrañaran ya del neutrino (que no se había descubierto todavía, era una partícula puramente especulativa), a pesar de que debiera de haberse reconocido como otra «variable oculta» más. Pero para entonces, obviamente, habían cambiado inconscientemente de posición, y también respecto a sus ideas sobre variables ocultas. En un principio, y especialmente en sus primeras discusiones con Einstein, el nombre de «mecánica cuántica» se usa, para la teoría del átomo (incluyendo el núcleo como *cosa normal).* Ahora el nombre se usaba cada vez más, simplemente, para referirse al poderoso formalismo matemático, debido principalmente a Heisenberg, Born, Jordan, Schrödinger, y Dirac, Gordon y Klein; un formalismo que, aunque empezó siendo una teoría del movimiento del electrón (negativo) en el campo positivo del núcleo, se fue aplicando progresivamente de una forma más amplia. Pero también este formalismo cambió considerablemente, como es natural, y se desarrolló mucho más allá de la teoría original de Heisenberg, Born y Jordan, la teoría que iba a ser el final del camino en física.

d) Cuando, en 1935, Yukawa predijo una nueva partícula, que más tarde se llamó mesón, la búsqueda de esa partícula llevó al descubrimiento de varios mesones diferentes. Pero ninguno de ellos, o de las muchas otras partículas elementales, fueron identificados como «variables (anteriormente) ocultas»; ni siquiera después de que las «variables ocultas» fueran liberadas del postulado original de von Neumann de que tenían que convertir la teoría probabilista en teoría determinista —un postulado que algunos (entre los que me cuento) han considerado imposible de satisfacer.

---

[19] Ruggero María Santilli, «An Intriguing Legacy of Einstein, Fermi, Jordan and Others: The Possible Invalidation of Quark Conjectures», *Foundations of Physics,* 11, 5/6, 1981, pp. 383-472, especialmente p. 448. Santilli se refiere aquí a su artículo en el *Hadronic Journal,* 2, 1979, p. 1.460, sección 2.4. Véase también el libro de Santilli, *Foundations of Theoretical Mechanics I: The Inverse Problem in Newtonian Mechanics,* Nueva York, 1978.

Mientras tanto, la teoría cuántica ha crecido. Su nombre se conservó, más o menos, puesto que la teoría conservaba ciertos principios característicos (las relaciones de conmutación, las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, el principio de exclusión de Pauli). Así, el nombre de «mecánica cuántica» se aplicó a la electrodinámica cuántica y a la teoría cuántica de campos (e, incluso, a la cromodinámica cuántica y a teorías que introducían nuevos números cuánticos y, por tanto, variables anteriormente «ocultas»). Y la defensa de Bohr, contra Einstein, de la tesis de que la mecánica cuántica era «completa» (en el sentido del final-del-camino) siguió considerándose válida, después de que la teoría hubiese cambiado radicalmente y después de que su incompletud se hubiera hecho demasiado obvia como para considerarla el posible objeto de una gran lucha.

Hay que admitir que la teoría no había cambiado precisamente de la manera que Einstein había esperado. Pero ésta no era, decididamente, la cuestión: Einstein no fue nunca dogmático, ni siquiera respecto a sus teorías mejor sustentadas, y, desde luego, nunca respecto a sus expectativas.

Sin embargo, le acusaron de dogmatismo los que, como Heisenberg (en el pasaje, citado más arriba, de su prefacio a la correspondencia entre Einstein y Bohr), siguieron aferrados a la tesis del final-del-camino después de que todas esas nuevas y quizá indeseadas revoluciones hubieran demostrado que el final del camino estaba todavía muy lejos.

He mencionado a Santilli, y me gustaría decir que él —que pertenece a una nueva generación— me parece moverse por una senda distinta. Lejos de mí la intención de desestimar a los gigantes que fundaron la mecánica cuántica bajo la dirección de Planck, Einstein, Bohr, Born, Heisenberg, de Broglie, Schrödinger y Dirac. Santilli también deja bien claro lo mucho que aprecia la obra de esos hombres. Pero en su enfoque distingue entre la región del «terreno de la aplicabilidad incontrovertible» de la mecánica cuántica (él la llama *«mecánica atómica»),* de la *mecánica nuclear* y de la *hadrónica* y sus argumentos, absolutamente fascinantes, en apoyo de la concepción de que la mecánica cuántica no debe considerarse, sin nuevas contrastaciones, como válida en la mecánica nuclear ni en la mecánica hadrónica, me parecen augurar el regreso a la cordura: a ese realismo y ese objetivismo que defendió Einstein y que habían sido abandonados por otros dos grandes físicos, Heisenberg y Bohr.

V

La situación actual en física sólo puede entenderse teniendo en cuenta estos antecedentes. Hay elementos en la situación actual que

son distintos de los mencionados más arriba; por ejemplo, en la obra de J. S. Bell (que discutiré más adelante). Pero incluso la obra de Bell está relacionada directamente con los problemas del realismo, la probabilidad y completud o finalidad a través del argumento de Einstein, Podolsky y Rosen; un argumento que fue, en su forma original, dirigido contra la oposición al realismo que era característica de la interpretación de Copenhague.

Durante la última década ha habido, de hecho, nuevos y estimulantes acontecimientos en la teoría cuántica. Se relacionan con el famoso experimento imaginario (1935) de Einstein, Podolsky y Rosen (al que me referiré como EPR). Este fue un experimento que hizo Einstein muy poco después de que yo tratase de realizar uno similar. Mi experimento, que publiqué en *Naturwissenschaften* y también en *Logik der Forschung* (1934), no era válido [20]. A causa de mi propia implicación en un argumento similar —aunque, desgraciadamente, equivocado— creo que es justo decir que yo fui uno de los primeros filósofos que se dio cuenta de la importancia del EPR, y siempre me he sentido muy interesado por él. Entre los físicos creó bastante alboroto desde el principio; pero los filósofos lo ignoraron.

[20] [K. R. Popper, «Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen», *Naturwissenschaften* 22, 48, 30 de noviembre de 1934, pp. 807-8; y *La lógica de la investigación científica (L. Sc. D.)*, sección 77 y nota de la pág. 206 y notas *3 y *4 a la sección 77; véase también *L.I.C. (L. Sc. D.)*, Apéndices *xii y *xi, sección 3; véase también capítulo I, sección 17, de este volumen. Max Jammer ha escrito en *The Philosophy of Quantum Mechanics*, 1974, pp. 174 y 178*n*, lo que sigue: «El debut científico de Popper —cuando todavía se ganaba la vida como maestro en una escuela elemental— fue un artículo en *Die Naturwissenschaften* (1934) que contenía lo que él llamó más tarde "un craso error que he lamentado profundamente y por el que he estado avergonzado desde entonces". No es imposible que fuese precisamente ese "error" el que impulsase a Einstein (que reconoció la equivocación inmediatamente) a publicar, con Podolsky y Rosen, el argumento contra la completud de la mecánica cuántica... Según el profesor Nathan Rosen, podría haber ocurrido que Popper influenciase a Einstein (comunicación privada, 22 de abril, 1967); pero según la señora Polly Podolsky, que mantenía un estrecho contacto con la obra de su marido (fallecido en 1966), es improbable que el artículo de Popper llegase a manos de Einstein antes de que se escribiera el primer borrador del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen (carta de Polly Podolsky, fechada el 1 de agosto de 1967). Sir Karl Popper expresó su opinión sobre esta cuestión en una carta fechada el 13 de abril de 1967, como sigue: "Respecto a su 'corazonada', la encuentro muy halagadora; pero debo decirle que nunca se me ocurrió antes de leer su carta. Nunca me pasó por la cabeza la posibilidad de que un *craso error* cometido por una persona insignificante (como yo) pudiera haber tenido alguna influencia en un hombre como Einstein. Desde un punto de vista puramente temporal, su corazonada no puede excluirse totalmente..." (carta al autor). Que, desde un punto de vista puramente lógico, su razonamiento estaba estrechamente relacionado con el argumento de Einstein, Podolsky y Rosen, Popper lo reconoció claramente cuando escribió en una nota a pie de página a la p. 244 de Ref. 3-5 (1959): "Einstein, Podolsky y Rosen usan un argumento *más débil* pero *válido*". De hecho, puede decirse que el argumento de Popper es un argumento EPR ultradeterminado.» Véase la exposición de Jammer de varias otras líneas de influencia en «The Prehistory of the EPR Argument» en la sección 6.2 de su obra, pp. 166-181. *Ed.*]

Ha sido el argumento EPR el que ha llevado a la nueva evolución de la teoría cuántica, en particular a lo que se llaman «las desigualdades de Bell» y el problema de localidad [21].

Hay que distinguir dos estadios de la discusión para entender la evolución que ha llevado al estado actual de cosas. El primero es el propio EPR original, que está escrito *contra* la acción a distancia. Desde el primer momento dejó claro que la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica entrañaba acción a distancia —incluso para distancias muy grandes.

Luego hay otro estadio, cuyo mérito pertenece a David Bohm [22]. Este estadio difiere del primero en varios aspectos. El argumento de Bohm se basaba en la polarización o *spin*. El spin no tiene ningún papel en el EPR original, que trataba de la posición y el momento, pero el spin tiene un papel crucial en la versión debida a Bohm. El EPR original era un experimento imaginario; al principio parecía imposible realizarlo experimentalmente. Pero la segunda forma, la de Bohm, ha resultado ser experimentalmente contrastable.

VI

El argumento EPR original era, esencialmente, una objeción a la interpretación que Heisenberg hacía de sus llamadas «relaciones de incertidumbre» o «relaciones de indeterminación»; es decir, de sus fórmulas.

$$(1) \qquad \Delta p_x \, \Delta q_x \geqq h/2\pi$$

Estas fórmulas enuncian que dos intervalos o recorridos —aquí el intervalo o recorrido Δp_x del momento en la dirección del eje x y el intervalo o recorrido de Δq_x de la posición a lo largo del eje x— están relacionados de tal modo que su producto no puede ser menor que la constante h de Planck dividida por 2π; lo que significa, naturalmente, que cuanto más pequeño hagamos Δp_x, mayor se hará Δq_x y viceversa.

Una fórmula como ésta es característica de cualquier teoría ondu-

---

[21] Véase mi artículo «Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky and Rosen, en Wolfgang Yourgrau y Alwyn van der Merwe, eds.: *Perspectives in Quantum Theory,* 1971, pp. 182-198. Actualmente no estoy ya satisfecho con ese artículo. Véase la excelente réplica de Bell en *Science,* 177, 1972, p. 880, y también la contribución de Bell a B. d'Espagnat, ed., *Foundations of Quantum Mechanics, Proceedings of the International School of Physics «Enrico Fermi»,* 1971, p. 171. Véase también la discusión en John F. Clauser y Michael A. Horne, «Experimental Consequences of Objective Local Theories», *Physical Review,* 10, 2, 15 julio 1974, pp. 526-535.

[22] David Bohm, *Quantum Theory,* 1951; y *Physical Review,* 85, pp. 169-193.

latoria. Puede derivarse, por ejemplo, de la aplicación de una teoría ondulatoria de la luz a una situación en la que un rayo de luz que se mueva en la dirección x caiga sobre una pantalla en la que haya una estrecha ranura.

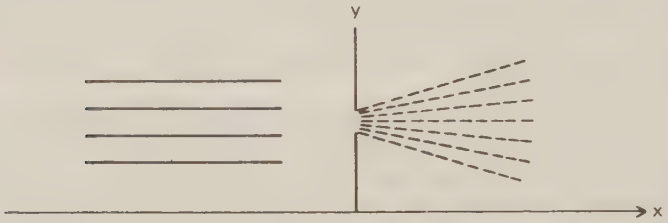

FIGURA 1

$$\Delta p_y \, \Delta q_y \geqq h$$

Cuanto más estrecha sea la ranura Δq_y, mayor será el ángulo de la dispersión de los momentos del rayo en la dirección y, después de que la luz haya pasado por la ranura. (Un resultado similar se obtiene de la teoría ondulatoria para electrones de Schrödinger.)

La fórmula (1) puede obtenerse, por ejemplo, aplicando la ecuación de ondas a la situación física (las condiciones iniciales) descrita en este ejemplo. Esto muestra que nuestra fórmula (1) necesita ser *interpretada:* se obtiene de la teoría cuando aplicamos la teoría a casos tales como el de un rayo cayendo sobre una pantalla con una ranura estrecha o a otros casos similares.

Ahora bien, según la interpretación de Heisenberg, y según la de Copenhague, en *todas las mediciones* surge una situación muy parecida a ésta, de modo que la fórmula (1) es válida para *todas las mediciones* de una variable y de una segunda variable no-conmutativa, para todas las partículas elementales, por ejemplo, fotones y electrones.

Al principio no se entendió que esto fuera parte del propio formalismo (por ejemplo, la ecuación de Schrödinger). Al principio, Heisenberg lo mostró al aplicar el formalismo a un número reducido de situaciones físicas que podían ser descritas como *mediciones.*

Heisenberg trató de explicar las limitaciones que su interpretación imponía a todas las mediciones posibles señalando que si medimos una partícula elemental, la perturbamos o interferimos con ella.

Esta primitiva interpretación de Heisenberg entrañaba que la partícula *tuviera* una posición y un momento nítidos pero que, debido a nuestra interferencia con la partícula, nunca pudiéramos medir ambos con nitidez.

Esta interpretación se cambió después de que Schrödinger sugirie-

se que una partícula podía estar representada por un paquete de ondas o podía, de hecho, *ser* un paquete de ondas [23].

El argumento de Einstein, Podolsky y Rosen puede considerarse dirigido contra *a)* la concepción de que una partícula no puede *tener* al mismo tiempo una posición y un momento nítidos y también contra *b)* la concepción de que *toda* medición de la posición tiene que interferir con el momento de la partícula y viceversa. Dicho en pocas palabras, el argumento se desarrolla como sigue [24]: Supongamos que tenemos un sistema compuesto que contiene dos partículas, *A* y *B*, y que es descrito por una ecuación de Schrödinger, antes de que se produzca colisión entre las partículas. Luego entran en colisión; y después se mide una de las partículas, a la que podemos llamar *A*. Podemos decidir medir varios aspectos; por ejemplo, podemos medir la posición; o podemos medir el momento. Si se mide la posición de *A*, esto, unido a la función Ψ del sistema compuesto, nos permitirá hallar la posición de *B*. Si se mide el momento de *A*, se puede obtener de la misma forma el momento de *B*. Como lo expresó Einstein: «La mecánica cuántica nos dará entonces [es decir, después de medir *A*] la función Ψ para el sistema parcial *B*, y *nos dará varias funciones* Ψ [de *B*] que diferirán, según el tipo de medición que hayamos decidido realizar sobre A» [25]. *B* puede, mientras tanto, haberse alejado tanto como se quiera —hasta Sirio, por ejemplo. Dicho de otro modo, contrariamente a las enseñanzas originales de la interpretación de Copenhague, puede predecirse la posición o el momento de *B* sin interferir de ningún modo con *B* y sin perturbarla, basándose en la medición (y perturbación) de *A* sola.

De hecho, *B* está demasiado lejos para que se pueda interferir con ella. Ahora bien, en EPR se *supone* que no hay acción a distancia (una suposición que proviene de la relatividad especial) y el EPR depende

[23] Las leyes naturales prohíben ciertos tipos de sucesos y también lo hace el principio de Heisenberg: ciertos sucesos físicos lógicamente posibles —digamos que un rayo de luz que pasase por una ranura sin dispersión— constituirían una contradicción lógica de la teoría. Siempre hubo personas a las que les gustó llamar «sin sentido» a esos sucesos prohibidos; pero eso es un error. Realmente deberíamos distinguir, como mínimo, tres cosas muy diferentes: sucesos lógicamente posibles, prohibidos por una teoría; sucesos lógicamente imposibles (o sucesos prohibidos por la lógica); y pseudo-enunciados sin sentido. La preocupación por los últimos estaba muy de moda en los años veinte y los primeros treinta, sobre todo debido al *Tractatus* de Wittgenstein y a su influencia en el Círculo de Viena. Sospecho que esta influencia fue la que hizo a John von Neumann intentar construir un lenguaje cuya lógica excluyese, como carentes de sentido, las fórmulas prohibidas por Heisenberg. No creo que tal lenguaje sea (o fuera) útil —ni que pueda resolver problemas físicos; y creo que no hace más que añadir confusión a los problemas filosóficos.

[24] Véase el excelente y breve enunciado que hizo Einstein del argumento EPR en la carta que me escribió el 11 de septiembre de 1935, impresa en *L.I.C. (L.Sc.D.)*, pp. 426-428.

[25] *Ibíd.*, p. 427-28.

de esta suposición. Esta suposición se llamó posteriormente «el principio de localidad» o «el principio de acción local». Del hecho de que podamos, cuando queramos, obtener la posición o el momento de *B* sin tener que medirlos directamente (sólo se mide *A),* Einstein concluye que *B* tiene que tener tanto posición como momento y que en cualquiera de las dos elecciones —tanto si se escoge una medición de posición como una de momento— la teoría cuántica nos proporciona sólo información incompleta de *B*. Y no puede ser que nuestra perturbación de *B* sea la que limite la información posible sobre *B* —porque no perturbamos a *B*—. El medir (o interferir con) el momento de *A* puede destruir la posición de *A;* el medir (o interferir con) la posición de *A* puede destruir el momento de *A*. Pero no podemos estar haciendo lo mismo con *B* —que puede estar a años luz de *A* y, en consecuencia, no resultar afectada por las mediciones que se efectúen sobre *A* (a menos, claro, que *exista* la acción a distancia —de hecho, acción instantánea, más rápida que la velocidad de la luz, porque la medición de *A* nos proporciona información sobre *B* para el momento preciso de tiempo en que hemos medido *A).*

Segun el principio de localidad, los objetos separados que no están en interacción son independientes. Así, *B* tiene que tener una realidad objetiva aparte de cualquier «acto de observación» y debe tener una posición nítida y un momento nítido al mismo tiempo, aunque nosotros no podamos conocer los dos al mismo tiempo.

(Diré, entre paréntesis, que el artículo EPR, a pesar de su indudable importancia, tiene, en mi opinión, ciertos defectos que han desviado la discusión sobre estas cuestiones. Por ejemplo, se ha prestado demasiada atención a la cuestión de a qué debemos llamar *«real»;* y se presta demasiada atención a la cuestión de si la mecánica cuántica es completa —una cuestión que, en mi opinión, es una pista falsa en este contexto, en la forma en que se expone normalmente, olvidando que tras ella se esconde la tesis que he llamado del «final-del-camino» en la sección III [26]: toda teoría física es incompleta en más de un sentido, y la incompletud de la mecánica cuántica es obvia —puesto que no da la clave, por ejemplo, de las relaciones entre los valores absolutos de las constantes físicas *e, c* y *h.)*

Las cuestiones más importantes planteadas en el artículo EPR son dos: 1) si la interpretación de Heisenberg (y las interpretaciones similares) es correcta: a saber, si la indeterminación puede explicarse como debida a la interferencia del observador con el objeto observado; y 2) si hay o no acción a distancia. ¿Es posible que, al hacer algo a *A* —al medir y observar a *A*, que está más a mano, por así decirlo— afectemos a *B,* que puede estar a una distancia de años luz?

[26] [Véanse las observaciones de Popper en «La mecánica cuántica sin el "observador"», reimpreso como Introducción a este volumen; y también el capítulo 2, sección 9, más adelante. *Ed.*]

Ahora bien, la acción a distancia está excluida (como ya se ha dicho) por la teoría especial de la relatividad de Einstein (que, dicho sea de paso, está bien corroborada experimentalmente). La relatividad especial entraña el principio de localidad. Si hubiera acción a distancia (incluso aunque no pudiera usarse esta acción para enviar señales [27]), entonces la relatividad especial tendría que ser corregida y adaptada en consecuencia. (En realidad, tendríamos que volver a la interpretación de Lorenz del formalismo de la relatividad especial, para lo cual, véase la discusión más adelante). Ni Einstein, ni Bohr (ni Heisenberg) sugirieron nunca que hubiera que abandonar el principio de localidad. Y yo creo que, si Bohr se hubiera encontrado ante resultados teóricos que sugirieran que la teoría cuántica entrañaba el abandono de la localidad, lo hubiera considerado un argumento de extraordinaria fuerza en contra de la teoría cuántica, y quizá incluso lo hubiera considerado una refutación de dicha teoría [28].

Esto queda claro en un intercambio, bastante poco conocido, que tuvo lugar entre Einstein y Bohr y que se publicó en *Dialectica* en 1948 [29]. En su artículo de *Dialectica,* Einstein propone un argumento muy modesto y muy simple contra la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica. Primero, formula claramente el principio de localidad, como se llama ahora, es decir, el principio de exclusión de la acción a distancia, refiriéndose a él como el principio de acción a distancias decrecientes o el «*Prinzip der Nahewirkung*». Luego observa que los principios de la mecánica cuántica, al menos en la interpretación de Copenhague, son incompatibles con ese principio de localidad, y que si la mecánica cuántica es verdadera, tal como la interpreta Bohr, tiene que haber acción a distancia.

Einstein continúa diciendo: «me parece bastante claro que esos físicos que consideran los modos de descripción de la mecánica cuántica como definitivos *("definitiv")* en principio reaccionarán a estas con-

---

[27] A menudo, los físicos suponen que sólo podría ser refutada la relatividad especial por la posibilidad de *enviar señales* cuya velocidad excediera la de la luz. Esto, sin embargo, no es correcto. En el momento en que decimos que dos sucesos distantes son simultáneos en un sentido absoluto, hemos abandonado la interpretación relativista de Einstein del formalismo de Lorenz-Einstein. Porque dentro de la relatividad especial, dos sucesos del eje x que son simultáneos en relación con el sistema de inercia S_1 no son nunca simultáneos en relación con el sistema de inercia S_2 a menos que S_1 y S_2 no estén moviéndose el uno respecto al otro a lo largo del eje x, incluso aunque no hubiera interacción (y, por tanto, señales) entre esos dos sucesos.

[28] Hay que recordar que Bohr apeló a la relatividad general para defender la validez general de las relaciones de Heisenberg; véase P. A. Schilpp, ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* pp. 225-228. Nunca se subrayará suficientemente que, aparte de Einstein en su artículo de *Dialectica,* nadie sospechó, antes de Bell, que la propia mecánica cuántica (y quizá no sólo la interpretación de Copenhague) está en conflicto con la localidad y, por tanto, con la relatividad especial.

[29] Albert Einstein, «Quantenmechanik und Wirklichkeit», *Dialectica,* 2, 3-4, noviembre de 1948, pp. 320-324.

sideraciones como sigue: suprimirán el requisito... de la existencia independiente de las cosas físicas reales en lugares distantes del espacio; y podrían sostener, acertadamente, que la mecánica cuántica no hace uso implícito de ese requisito en ningún momento».

Einstein acepta inmediatamente esa afirmación: admite que el principio de localidad no es una tesis explícita de la teoría cuántica. Pero a continuación nos advierte que, cuando él piensa en todos los fenómenos físicos que le son conocidos, y especialmente en aquéllos que la mecánica cuántica describe con éxito, no encuentra, no obstante, en ningún lugar, un hecho físico que le haga considerar probable la necesidad de abandonar el principio de localidad. Einstein concluye que «en cualquier caso, uno no debiera, en mi opinión, aferrarse dogmáticamente *(dogmatisch festlegen)* a las formulaciones de las teorías contemporáneas, mientras busca una base unitaria para toda la física».

Al consultar la réplica de Bohr al artículo de Einstein [30] (que, dicho sea de paso, aunque éste la escribió después, y con el artículo de Einstein delante, Pauli la publicó antes) o la propia introducción editorial de Pauli a la discusión, se tiene la clara impresión de que ninguno de los dos pensó que Einstein interpretaba correctamente la mecánica cuántica cuando mantenía que implicaba acción a distancia. Pauli descarta como «sin sentido» cualquier enunciado sobre los valores simultáneos de los observables para los que no existe vector posible en el espacio de Hilbert, y parece pensar que ésta es una respuesta suficiente para Einstein. Y si uno lee el artículo de Bohr, encuentra que éste no admite en ninguna parte, y lo sostiene contra Einstein, que en la mecánica cuántica haya realmente acción a distancia.

VII

Como consecuencia de los planteamientos de la última década, sin embargo, todo esto parece haber cambiado. Muchos físicos contemporáneos dirían que lo que podríamos llamar la «alternativa einsteiniana» —o la mecánica cuántica o el principio de localidad— estaba, de hecho, formulada correctamente (aunque no parecen saber que la formuló Einstein), lo que implica que el argumento de Bohr contra el análisis de Einstein era incorrecto e incluso incoherente; *pero piensan, no obstante, que Einstein estaba equivocado en seguir aferrado al principio de localidad; y que la posición filosófica no realista de Bohr era correcta.*

Estos nuevos planteamientos datan de la reformulación de David

[30] [Véase también la discusión de Popper de las réplicas de Bohr a Einstein en *L.I.C. (L.Sc.D.),* Apéndice *xi. *Ed.*]

Bohm del EPR en términos de spin, en vez de en términos de posición y momento. La versión de Bohm del EPR (que, desde mi punto de vista, difiere significativamente del EPR original) supone que hay dos partículas cuyos spins interactúan. Después se mide el spin de una y, por medio de él, se obtiene el spin de la otra. Se pueden medir diferentes componentes del spin de *A*, por ejemplo. Y así obtenemos los componentes correspondientes al spin de *B* [31].

Quizá deba mencionar aquí algunas de las diferencias entre el argumento original del EPR y la versión que de él hizo Bohm. Esas diferencias se refieren a la distinción de dos tipos de preparaciones mecánico-cuánticas de estado [32]. Las preparaciones de estado pueden ser simplemente selectivas, o pueden, además, imponer nuevas propensiones —como ocurre en el caso de seleccionar el estado de una partícula por medio de un polarizador (por ejemplo, un prisma de Nicol o una turmalina). El primer tipo está relacionado o bien con experimentos de medición puramente retrodictivos o con el tipo de preparación de estado que he llamado «selección física» [33]. La versión de

---

[31] Bell señaló que en la versión del EPR de Bohm es posible un experimento crucial con respecto a una partícula *B* polarizada. Es decir, cuando hacemos algo a una partícula *A*, algo debería ocurrirle simultáneamente, según la teoría cuántica, a la partícula *B;* mientras que según una teoría de sentido común, realista y local, la partícula *B* no resultaría afectada —o al menos, no simultáneamente. Estos experimentos no son cruciales simplemente entre la interpretación de Copenhague y el formalismo de la teoría cuántica. Por el contrario, en estos experimentos, hemos puesto a un lado el formalismo de la teoría cuántica y la interpretación de Copenhague, y al otro, las teorías localistas y, por tanto, la teoría de la relatividad especial. [Véase John F. Clauser y Abner Shimony, «Bell's Theorem: Experimental Tests and Implications», *Reports on Progress in Physics,* 1978. Véase también la discusión de Popper sobre Bohm en *L.I.C. (L.Sc.D.),* Apéndice *xi, *Ed.*]

[32] Creo que la idea de preparación de estado, en el sentido en que se emplea ahora en mecánica cuántica, fue introducida por mí en 1934 en *L.I.C.;* véanse esp. pp. 223-224. Allí la llamaba «selección física» y la diferenciaba como una especie de medición predictiva frente a aquellas mediciones retrodictivas (como el registro de una partícula en una placa fotográfica) que pueden interferir fuertemente con una partícula e incluso destruirla, de las que Heisenberg había sugerido que podían carecer de sentido a causa de su carácter no-predictivo. Henri Margenau se refirió a las preparaciones de estado en un artículo en 1937.

[33] Los dos tipos de preparaciones de estado que se discuten aquí no deben confundirse con los dos tipos de mediciones (retrodictivas y predictivas —las últimas son proparaciones de estado—) mencionadas en la nota precedente. Las mediciones predictivas o preparaciones de estado producen siempre, en mecánica cuántica, una dispersión de aquellos «observables» que se caracterizan por variables que no conmutan con las variables que caracterizan el estado preparado. Una medición (o preparación de estado) del spin tiene, en efecto, el carácter de «ratonera» en el sentido que introduzco en L.I.C., Apéndice *xi, p. 412. Aunque es verdad para el spin, no lo es para la posición y el momento. Sólo el spin tiene esta extraña propiedad. Es decir, la ratonera es válida para algunas preparaciones de estado y no para otras. Véase mi artículo «Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky and Rosen» en Wolfgang Yourgrau and Alwyn van der Merwe, eds., *Perspectives in Quantum Theory,* 1971, esp. pp. 187-189.

Bohm (y, por tanto, también la de Bell) del EPR, sin embargo, es selectiva en el segundo sentido: estos experimentos están basados en mediciones de polarización que imponen nuevas propensiones a las partículas en cuestión. De ahí que haya al menos una posibilidad de que un experimento con este tipo de preparación de estado difiera significativamente de un experimento con el otro tipo de preparación de estado. En realidad, es posible que el experimento de Bohm-Bell decida en favor de la acción a distancia y, por tanto, en contra de la teoría de la relatividad especial, mientras que el argumento EPR original no lo hace. Si esto ocurriera, tendríamos una diferencia muy nueva e interesante entre dos tipos de selección o preparación de estado.

(Entre paréntesis, puede mencionarse que hay algunos otros problemas con respecto al spin. En primer lugar, sabemos tan poco sobre el spin que podría ocurrir que Bohm estuviera equivocado al suponer que su versión del EPR, referente al spin, es esencialmente equivalente a la forma propuesta por Einstein. La razón que tengo para decir esto es que no tenemos una teoría realista del spin. El spin, tal como ocurre en teoría atómica difiere de lo que normalmente, de modo realista, llamamos spin [giro]. El spin es verdaderamente algo muy peculiar y *en un sentido* no es clásico. Quizá con el spin se tenga realmente acción a distancia [véase más adelante]. Pero no necesariamente para toda distancia: con grandes distancias puede no funcionar. Pero esto es crucial para el EPR original. El argumento original estaba *pensado* para utilizar grandes distancias. Así, si encontramos evidencia de «acción a distancia» para una distancia corta, esto puede no ser realmente ilustrativo contra la versión original del EPR, sino sólo contra el argumento del EPR en la versión de Bohm. Así pues, los argumentos que se refieren al spin pueden no ayudar decisivamente a la interpretación de Copenhague, después de todo. Esos nuevos experimentos salvarían la interpretación de Copenhague sólo si la acción no local funcionase a distancias de cualquier magnitud. A propósito, pocas veces se comprende, incluso ahora, la necesidad de distinguir entre el formalismo de la mecánica cuántica y la interpretación de Copenhague.)

Sea lo que fuere, una vez que se reenuncia el experimento EPR en términos de spin, no necesita ser un simple experimento imaginario; puede ser efectivamente contrastado. La base teórica de dicho experimento fue elaborada por J. S. Bell; y actualmente se han realizado algunos experimentos de ese tipo [34]. (Mis observaciones en lo que

[34] [Véase J. S. Bell, «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox», *Physics*, 1, 3, 1964, pp. 195-200; «On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics*, 38, 1966, pp. 447-452; *Epistemological Letters*, 15, Bienne, Francia, 79-84. Para los experimentos, véase S. J. Freedman y J. F. Clauser, «Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories», *Physical Review Letters*, 28, 1972, pp. 935-941; R. A. Holt y F. M. Pipkin, *Quantum Mechanics vs. Hidden Variables:*

sigue están basadas en el supuesto de que la *interpretación* de Bell de su teorema es físicamente correcta; esto es, sin embargo, una cuestión abierta.)

Estas contrastaciones implican lo que se llama ahora la desigualdad de Bell. Aunque los resultados de las contrastaciones no son, hasta el momento, concluyentes, la mayoría de ellos parecen ir contra lo que Bell llama «teorías locales realistas» y en favor de la teoría cuántica y quizá incluso de la interpretación de Copenhague.

Debo admitir que los resultados de estas contrastaciones me han sorprendido. Cuando oí por primera vez que John F. Clauser y Abner Shimony intentaban contrastar el teorema de Bell, esperaba que sus resultados refutasen la teoría cuántica. Pero mi expectativa parece haber sido equivocada, puesto que la mayoría de las contrastaciones han tenido el resultado contrario.

VIII

No obstante, no he abandonado mi interpretación realista de la física; y, de momento, ni siquiera he abandonado el principio de localidad.

Por el contrario, pienso (al revés que Abner Shimony) que no hay la mínima razón para suponer que esos nuevos experimentos afecten al realismo, incluso aunque sus resultados mostrasen que no puede sostenerse el principio de localidad. Más bien, como explicaré en la próxima sección, las consecuencias, si son correctas, irán contra la interpretación de Einstein del formalismo de la teoría de la relatividad especial y en favor de la interpretación que hace Lorenz de él y en favor del «espacio absoluto» de Newton. (Y tanto Newton como Lorenz fueron, desde luego, realistas.)

Estos nuevos experimentos, basados en el teorema de Bell, serían efectivamente los primeros que pudieran considerarse como cruciales

---

Polarization Correlation Measurement on an Atomic Mercury Cascade, 1973; John F. Clauser, «Experimental investigation of a Polarization Correlation Anomaly», *Physical Review Letters,* 36, pp. 1.223-1.226, 1976; E. S. Fry y R. C. Thompson, «Experimental Test of Local Hidden Variables Theories», *Physical Review Letters,* 37, 1976, pp. 465-468; G. Faraci, S. Gurkowski, S. Natarrigo y A. R. Pennisi, «An Experimental Test of the EPR Paradox», *Lettere al Nuovo Cimento,* 9, 1974, pp. 607-611; L. R. Kasday, J. D. Ullman y C. S. Wu, «Angular Correlation of Compton-scattered Annihilation Photons and Hidden Variables», *Nuovo Cimento,* 25B, 1975 (ser. 2, n.° 2), pp. 633-661; M. Lamehi-Rachti y W. Mittig, «Quantum Mechanics and Hidden Variables: A Test of Bell's Inequality by the Measurements of the Spin Correlation in Low Energy Photon-proton Scattering», *Physical Review* D, 14, 1976, pp. 2.543-2.555. Véase K. R. Popper, A. Garuccio, J.-P. Vigier, «An Experiment to Interpret EPR Action at-a-Distance: The Possible Detection of Real De Broglie Waves», *Epistemological Letters,* 30, julio de 1981, pp. 21-29. *Ed.*]

entre la teoría de Lorenz y la teoría de la relatividad especial —aunque no se hubieran concebido como tales y aunque nadie (que yo sepa) haya dicho que pudieran usarse de esta manera para decidir entre Lorenz y Einstein.

Durante mucho tiempo, y con bastante independencia del argumento EPR, he dicho que aunque la idea de que no hay acción a distancia es, en todos los aspectos, intuitivamente más satisfactoria —especialmente para un realista— que la idea de que hay acción a distancia, no debemos pensar que tenemos ningún conocimiento a priori de que la acción a distancia sea imposible, o de que el realismo la excluya.

Esta concepción difiere un poco de la de Einstein, que escribió: «Pero hay *un* supuesto que, en mi opinión, debemos retener bajo cualquier circunstancia: el estado real y objetivo del sistema S_2 es independiente de lo que se le haga al sistema S_1, *cuando* S_1 es un sistema que está espacialmente separado de S_2»[35]. Yo creo que no debemos abandonar este supuesto a la ligera; pero no necesitamos retenerlo «bajo cualquier circunstancia». Debemos estar preparados a considerar la posibilidad de que haya acción a distancia, después de todo.

Pero antes de descartar un principio tan satisfactorio intuitivamente, como el de la acción local, hay que reconsiderar toda la situación con mucha más profundidad y amplitud de lo que se ha hecho hasta el momento. Naturalmente, como ya he mencionado, la acción a distancia es incompatible con la relatividad especial; es decir, con la interpretación de Einstein (contraria a la de Lorenz) del formalismo de la relatividad especial. Y, si se aceptase, exigiría una modificación considerable de la teoría de la relatividad especial. No sugiero con esto que la teoría de la relatividad especial —es decir, la interpretación de Einstein— tenga que ser arrojada por la borda. Pero tenemos que recordar que la relatividad especial debe ser considerada, desde el punto de vista de la teoría de la relatividad general, solamente como una primera aproximación.

En cualquier caso, lo más importante que quiero decir —y, como creo, que Einstein quería decir— es esto: La manera normal en que ocurren las cosas en este mundo está de acuerdo con la acción local y, por tanto, es bastante contraria al resultado aparente de los experimentos citados. Si aceptásemos la acción a distancia, tendríamos que reconocer que hay dos maneras de que ocurran las cosas en el mundo, una normal y otra anormal. Esto sería un golpe muy serio contra el sentido común. Pero todas nuestras ideas de sentido común, incluida ésta, deben estar siempre abiertas a la crítica.

Además, no es sólo el sentido común lo que entra en conflicto con

[35] Véase P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein, Philosopher-Scientist,* 1949, p. 85. La traducción está ligeramente revisada aquí.

esos experimentos y con el rechazo de la localidad. Todo lo que sabemos por la astronomía y por el éxito técnico de la física también entra en conflicto con ellos: todo ello sugiere la realidad del tiempo y la exclusión de la acción a distancia. Aún más importante, las consecuencias idealistas —sobre todo, la teoría de que el flujo del tiempo es una ilusión subjetiva— que están deduciéndose de esos experimentos y de toda la situación en la física atómica, me parecen chocar de forma significativa con la biología y con la teoría de la evolución [36].

Tendremos, pues, que exigir mucho más que esos experimentos recientes, sobre los que, en cualquier caso, tendrán que responderse muchas preguntas, antes de rechazar la localidad. Y, una vez más, esos experimentos —a pesar de lo que se afirma frecuentemente— no están de ninguna manera en conflicto con el realismo. Los filósofos y los físicos han sido demasiado propensos, durante los últimos sesenta años, en gran medida bajo la influencia indirecta del positivismo de Mach, a adoptar posturas idealistas. Una de las cosas que pretende este tomo del *Post Scriptum* es reexaminar muchos de los argumentos pasados del idealismo —que muchos físicos actuales siguen dando simplemente por sentados— y mostrar su error.

IX

Quiero proponer un sencillo experimento que puede considerarse como una extensión del argumento de Einstein, Podolsky y Rosen [37]. Tal como se formuló originariamente, el «experimento imaginario» EPR es solamente un argumento, no un experimento real. Quiero sugerir un experimento crucial para *contrastar* si el conocimiento solo es suficiente para crear «incertidumbre» y, con ella, dispersión (como se sostiene bajo la interpretación de Copenhague), o si es la situación física la que es causante de la dispersión.

Tenemos una fuente *S* (digamos que positronio) desde la cual se emiten, en direcciones opuestas, pares de partículas que han interactuado. Consideramos los pares de partículas que se mueven en direcciones opuestas a lo largo del eje positivo y negativo *x*, hacia dos pantallas *A* y *B* con ranuras cuya anchura Δq_x *es ajustable (véase fig. 2, pág. 50). Más allá de las ranuras, en los dos lados, hay bacterias de contadores Geiger colocados en semicírculo.*

---

[36] Véanse las observaciones de Popper en Peter Medawar y Julian Shelley, *Structure in Science and Art, Proceedings of the Third C. H. Boehringer Sohn Symposium, Kronberg, Taunus,* Amsterdam, 1980, pp. 154-168, esp., p. 167. Véase también W. W. Bartley, III, «Philosophy of Biology *versus* Philosophy of Science», *Fundamenta Scientiae* 3, 1, 1982. *Ed.*]

[37] El experimento podría hacerse, en principio, con pares de fotones creados por la aniquilación de partículas.

Suponemos que la intensidad del haz de las partículas emitidas es muy baja, de forma que hay una probabilidad alta de que dos partículas registradas al mismo tiempo a la izquierda y a la derecha sean precisamente las que interactuaron antes de la emisión.

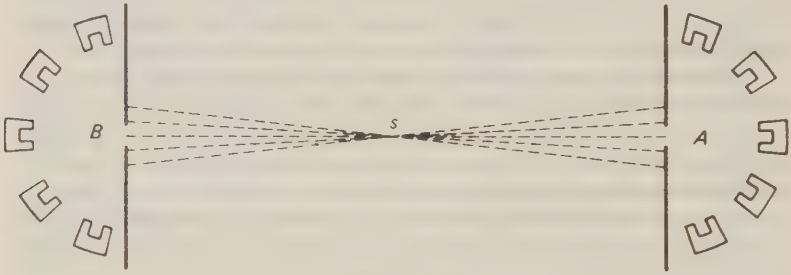

FIGURA 2

Las partículas que pasaron a través de las ranuras *A* y *B* serán contadas por los contadores Geiger. Estos contadores son contadores de coincidencia; es decir que están conectados con cables de tal modo que sólo cuentan las partículas que han pasado al mismo tiempo por *A* y por *B*. Con esto es casi seguro que sólo se registran las partículas que hayan interactuado.

Ahora contrastamos, en primer lugar, la dispersión de Heisenberg para los dos haces de partículas, el que va hacia la izquierda y el que va hacia la derecha, ensanchando o estrechando las dos ranuras *A* y *B*. Si las ranuras son más estrechas, entonces deberían entrar en juego los contadores que están más arriba y más abajo, vistos desde las ranuras. La entrada en juego de esos contadores es indicación de la mayor amplitud de los ángulos de dispersión que corresponden a una ranura más estrecha, de acuerdo con las relaciones de Heisenberg.

Ahora hacemos muy estrecha la ranura en *A* y muy ancha la ranura en *B*.

Según el argumento EPR, hemos medido q_y para las dos partículas (la que pasa por *A* y la que pasa por *B)* con la precisión Δq_y de la ranura en *A*, puesto que ahora podemos calcular la coordenada *y* de la partícula que pasa por *B* con la misma precisión aproximadamentae, aunque la ranura sea muy ancha.

Así obtenemos un «*conocimiento*» bastante preciso sobre la posición q_y de esta partícula —hemos «medido» su posición *y* indirectamente. Y puesto que, según la interpretación de Copenhague, es nuestro *conocimiento* lo que la teoría describe —y, sobre todo, lo que describen las relaciones de Heisenberg— deberíamos esperar que el momento p_y del haz que pasa por *B* se dispersase tanto como el haz que

pasa por *A*, aunque la ranura en *A* sea mucho más estrecha que la ranura, muy abierta, de *B*.

Ahora, la dispersión, en principio, puede contrastarse con ayuda de los contadores. Si la interpretación de Copenhague es correcta, entonces, aquellos contadores que están en el extremo más alejado de *B*, que son indicativos de una dispersión más amplia (y de una ranura más estrecha) deberían contar ahora coincidencias: contadores que no contaron ninguna partícula antes de que se estrechase la ranura en *A*.

En resumen: si la interpretación de Copenhague es correcta, entonces, cualquier incremento en la precisión de nuestro *mero conocimiento* de la posición q_y de las partículas que se dirigen hacia la derecha debería incrementar su dispersión; y esta predicción debería ser contrastable.

Si, como me inclino a predecir, la contrastación decide en contra de la interpretación de Copenhague, entonces, esto no significa que la mecánica cuántica (digamos, el formalismo de Schrödinger) pierda fuerza; aunque sí que significaría que pierde fuerza la afirmación de Heisenberg de que sus fórmulas son aplicables a todos los tipos de mediciones indirectas (una afirmación que los adeptos a la interpretación de Copenhague —tales como von Neumann— considerarían, sin duda, como parte de la mecánica cuántica).

¿Cuál sería la posición si el experimento (contra mi expectativa personal) apoyase la interpretación de Copenhague —es decir, si las partículas cuya posición *y* ha sido medida indirectamente en *B*, mostrasen incremento en su dispersión?

Esto podría interpretarse como indicación de acción a distancia; y en ese caso, significaría que tendríamos que abandonar la interpretación de Einstein de la relatividad especial y volver a la interpretación de Lorenz y con ella al espacio y al tiempo absolutos de Newton. En ese caso, no necesitamos abandonar ninguna fórmula de la teoría de la relatividad especial. Porque la relatividad especial es una interpretación de un formalismo; y el mismo formalismo puede ser interpretado bien por la relatividad especial, bien por la concepción de Lorenz de que tenemos un espacio y un tiempo absolutos pero que no podemos detectarlos por razones que revela el formalismo. Mientras que la teoría de la relatividad especial, en la interpretación de Einstein, dice que la simultaneidad no tiene un sentido absoluto; que si no tenemos ninguna forma de detectar el espacio y el tiempo absolutos —si su detección es, de hecho, excluida por el formalismo— entonces no debemos suponer que existen.

Desde luego, en aquellos días, la adhesión de Lorenz a un éter en reposo y a un espacio y un tiempo absolutos, newtonianos, era un poco chocante, mientras que la interpretación relativista del formalismo era sencilla, elegante y convincente. Lo decisivo de la teoría de Einstein, desde mi punto de vista, es que ha mostrado que la teoría

de Newton —que ha tenido más éxito que ningúna otra teoría jamás propuesta— *puede* ser sustituida por una teoría alternativa que sea de mayor alcance y que esté relacionada de tal forma con la teoría de Newton, que todo éxito de la teoría newtoniana sea también un éxito para esa teoría, y que, de hecho, efectúe unos ligeros ajustes en algunos resultados de la teoría de Newton. Así pues, para mí, esta situación lógica es más importante que la cuestión de cuál de las dos teorías es, en realidad, la mejor aproximación a la verdad.

También Bohr, naturalmente, era un admirador apasionado de la teoría de la relatividad especial. Hubiera deseado evitar tener que rechazarla —como casi todo el mundo en aquellos días—. Si se hubiera mostrado que ese rechazo era necesario si queríamos mantener la mecánica cuántica, ello podría muy bien haber significado, incluso para Bohr, el rechazo de la mecánica cuántica. Porque la relatividad especial estableció, más o menos, la norma a la que la mecánica cuántica tenía que conformarse.

Sólo ahora, a la luz de los nuevos experimentos que tienen su origen en la obra de Bell, puede hacerse la sugerencia de sustituir la interpretación de Einstein por la de Lorenz. Si hay acción a distancia, entonces hay algo parecido al espacio absoluto. Hay que recordar que nunca antes se había concebido nada parecido a un experimento crucial entre la teoría de Lorenz y la teoría de la relatividad especial. Si tenemos ahora razones teóricas, provenientes de la teoría cuántica, para introducir la simultaneidad absoluta, entonces, tendremos que volver de nuevo a la interpretación de Lorenz [38].

X

Este tomo del *Post Scriptum* se refiere principalmente a problemas de física, mientras que, al mismo tiempo, lleva a lo que yo llamo un «Epílogo metafísico», que esboza el esquema de lo que me parece a mí una forma nueva y prometedora de considerar el cosmos físico y, sobre todo, el problema de la materia; una forma que, espero, puede ser capaz de resolver algunas de las mayores dificultades de la teoría cuántica. Este tomo, pues, no está tan inspirado por la teoría microfísica, aunque es muy importante, sino más bien por la cosmología física [39].

---

[38] Hay argumentos independientes en favor de ese proceder, sobre todo desde que se descubrió la radiación de fondo cósmica de microondas. Véase E. K. Conklin, *Nature*, 222, 1972, p. 971. [De junio de 1980 data la sugerencia de Popper de que los experimentos que establecen la inexistencia de la localidad podrían usarse como experimentos cruciales entre Lorenz y Einstein. *Ed.*]

[39] Este interés me ha llevado, en el transcurso de los años desde que escribí por primera vez esta parte del *Post Scriptum*, más allá de la física, especialmente a la bio-

Las especulaciones cosmológicas juegan, siempre lo han jugado, un papel inmensamente importante en la evolución de la ciencia. Al examinar y escudriñar esas teorías especulativas podemos desarrollarlas en gran manera, y quizá acabar por llevarlas a un punto en el que pueden ser contrastadas empíricamente. (Esto hicieron, por cierto, los autores de la teoría del estado constante del universo en expansión: las contrastaciones llevaron a abandonar la teoría.) Muchas especulaciones cosmológicas —en particular en sus formulaciones iniciales— no pueden ser contrastadas ni falsadas empíricamente; por tanto prefiero llamarlas «metafísicas» en lugar de «científicas».

En este tomo, introduje el término «programa metafísico de investigación» para referirme al doble carácter de esas importantes teorías cosmológicas: su carácter programático, que a menudo da forma y determina el curso de la investigación y la evolución científicas, y su carácter incontrastable (en todo caso, al principio) y, por tanto, metafísico.

En el «Epílogo metafísico» de este volumen dije poco sobre los programas de investigación en general. Más bien propuse un programa real de investigación para aplicarlo a los problemas reales de la física y la biología y para interpretar esos problemas. Mientras introducía mi propio programa metafísico de investigación tuve que examinar la historia de la ciencia y reconstruir la «lógica de la situación»; es decir, articular las situaciones de los sucesivos problemas en física (y más tarde en biología), en cuyos términos había que considerar mi propio programa metafísico de investigación y sus muchos precursores y competidores, para que pudieran ser comprendidos, criticados y valorados.

Tales programas metafísicos de investigación se encuentran por todas partes. Determinan lo que se considera una explicación satisfactoria en cualquier momento de la evolución de un problema científico, o surgen de dicha explicación. Parece que lo que Thomas S. Kuhn iba a llamar «paradigmas» [40] es, de algún modo, similar, aunque, naturalmente, mi punto de vista es radicalmente distinto del suyo: yo considero esos problemas en términos de una situación que puede ser reconstruida racionalmente y veo las revoluciones científicas como algo debido, esencialmente, a la crítica racional —la clase de actividad que considero más importante en la historia de la ciencia. Hay que admitir que la refutación de una teoría científica puede tener a menudo un impacto sobre el científico (como, por ejemplo, en

---

logía, a la mente humana y a los productos de la mente humana (a los que he llamado Mundo 3). Véase *Conocimiento objetivo (Obj.Kn.,* 1972); *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977); y también el Epílogo y los Addenda al tomo II del *Post Scriptum.*

[40] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions,* 1962.

el caso de Rutherford) similar a una conversión; pero se trataría de una conversión racional [41].

Usé el término de «programas metafísicos de investigación» para ciertos programas de investigación para la ciencia; es decir, para los que todavía no son contrastables. Más de diez años después, algunos de mis colaboradores cambiaron el nombre a «programas científicos de investigación» [42]. Estos programas de investigación pertenecen realmente a la ciencia y juegan un papel de crucial importancia en su desarrollo. Pero normalmente no tienen todavía el carácter de teorías científicas contrastables. Pueden *llegar a ser* teorías científicas, pero entonces ya no hay ninguna razón para seguir llamándolos programas de investigación. En cualquier caso, son mucho más difíciles de criticar que las teorías —y es mucho más fácil retenerlos sin someterlos a crítica.

En realidad, no hay necesidad de alabar los méritos de los programas de investigación (y mucho menos de desarrollar una «metodología» para ellos). Los científicos, gracias a su formación, están bien adaptados a los programas de investigación (hasta ahí, podríamos decir que Kuhn tiene razón). Hay muchas más razones para preocuparse por quedarse aferrado a un programa de investigación o a ser «programado» por él. En general, hace mucha más falta animar a la gente a criticar y a escaparse de los programas de investigación que a adoptar uno y a adherirse a él —a menos, claro, que uno tenga que promocionar su nuevo programa de investigación.

(Hay una explicación sencilla para esto en términos de la lógica de la situación. A menos que tenga unas dotes bastante inusuales y

---

[41] Véase mi «The Rationality of Scientific Revolutions», The Herbert Spencer Lecture for 1973, en Rom Harré, ed., *Problems of Scientific Revolution: Progress and Obstacles to Progress in the Sciences,* 1975.

[42] [Véase Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes,* 1978. Lakatos conocía el *Post Scriptum* de Popper y poseía una copia de las galeradas originales de 1957. En un lugar *(Criticism and the Growth of Knowledge,* 1970, ed. Lakatos y Musgrave, p. 183 ss.), se refiere al *Post Scriptum* y transcribe largas citas de él. (En esa exposición, deforma la concepción de Popper, y le acusa de ignorar la «irrefutabilidad metodológica» en favor de la «irrefutabilidad sintáctica». Popper distingue entre las dos en *L.I.C.*, capítulo IV, esp. sección 20.) En otra publicación —«Changes in the Problem of Inductive Logic», en I. Lakatos ed., *The Problem of Inductive Logic,* 1968, p. 316— Lakatos introduce la idea de programa de investigación sin atribuir a Popper el mérito, en ningún momento. Quizá como consecuencia de ello, las supuestas concepciones de Popper se presentan ahora, a menudo, como la posición «ortodoxa», en contraste y oposición con la «metodología de los programas científicos de investigación» de Lakatos. Véase, por ejemplo, Peter Urbach, «The Objective Promise of a Research Programme», en Gerard Radnitzky y Gunnar Andersson, eds., *Progress and Rationality in Science,* 1978, pp. 99 ss. Véase la discusión de W. W. Bartley, III, sobre el cambio de nombre en su «On Imre Lakatos» en R. S. Cohen, P. K. Feyerabend y M. W. Wartofsky, eds., *Essays in Memory of Imre Lakatos,* 1976, pp. 37-38. Véase también su discusión en «The Philosophy of Karl Popper: Part III: Rationality, Criticism, and Logic», *Philosophia,* Israel, febrero 1982. *Ed.*]

que haya recibido una enseñanza inusualmente buena, el joven científico puede sentirse tan abrumado por la riqueza del campo en el que trata de entrar y tan agobiado por las tareas que ve, que desespera de su capacidad de hacer una contribución. Su tarea se ve facilitada por un programa de investigación. Esta explicación en términos de la situación puede considerarse un apoyo muy parcial a la idea de Kuhm del científico «normal».)

Por lo general, nos hacemos conscientes de nuestro programa de investigación cuando se nos ocurre de pronto que podría estar basado en una metafísica *falsa*. *Darnos cuenta* de que estamos trabajando dentro de un determinado programa metafísico de investigación es, esencialmente, darnos cuenta de que son posibles las alternativas; y este mismo darnos cuenta significa que abandonamos nuestro programa metafísico de investigación como *la* heurística, y consideramos las alternativas como posiblemente más fructíferas.

En esos raros casos en los que uno se hace consciente del programa metafísico de investigación (o incluso, cuando lo inventa deliberadamente, como en el caso de la cosmología propensivista), entonces, sólo debería recomendarlo con la advertencia de que hay que ser muy crítico respecto a él y buscar posibles alternativas.

Esta es una cuestión que atañe a la racionalidad del hombre y, especialmente, a la racionalidad de la ciencia. Debemos estar siempre atentos para no convertirnos en «científicos normales»: científicos que trabajan ciegamente, acríticamente, dentro de las presuposiciones inconscientes de un programa de investigación. Un «científico normal» no intenta ser todo lo racional que puede, porque no intenta ser todo lo crítico que puede.

Los metodólogos de los programas científicos de investigación me parecen mostrar un grado insuficiente de comprensión del papel fundamental de la crítica en el aumento del conocimiento [43]. Tal como la veo yo, la crítica es el primer *deber* del científico y de cualquiera que quiera hacer avanzar el conocimiento. Ver nuevos problemas y tener nuevas ideas, por otra parte, *no* son deberes de uno: la originalidad es, más bien, un don de los dioses.

En realidad, la fascinación por los programas de investigación que se ha manifestado en esta última moda está profundamente relacionada con el viejo anhelo de originalidad y con el anhelo de una heurística, un algoritmo, un «método científico» que lleve ideas nuevas y mejores [44]. Como ya he sugerido en otro lugar, no parece existir esa

---

[43] Véase I. Lakatos y Alan Musgrave, eds., *Criticism and the Growth of Knowledge*, 1970.

[44] Véase *Realismo y el objetivo de la ciencia (R. & A. Sc.)*, Tomo I del *Post Scriptum*, Introducción, en donde el lector verá que llevo muchos años arguyendo en contra de la posibilidad de tal método o heurística.

heurística, esa metodología positiva. Y respecto a la vieja cuestión del método, de por qué unas personas tienen buenas ideas y otras no, me parece que la respuesta adecuada es que algunas personas tienen muchas ideas —quizá unas pocas sean buenas— y son muy críticas respecto a sus propias ideas; mientras que otras tienen sólo pocas ideas y, por tanto, no son muy críticas respecto a ellas. Quizá pueda uno aumentar el número de ideas que tiene, y desde luego, uno puede aumentar la actitud crítica hacia todas las ideas propias. En cualquier caso, nunca podemos estar seguros de avanzar en la dirección correcta. Incluso si resultase que existe una heurística tal —incluso si hubiera un camino practicable hacia las nuevas ideas o los nuevos problemas que parecieran «buenos» o «progresistas»— el ser crítico respecto a ese camino continuaría siendo una de nuestras principales tareas. Puede muy bien ocurrir que estemos en un camino equivocado incluso cuando —y especialmente cuando— pensamos que estamos progresando. Incluso Einstein parece haber estado en el camino equivocado (como explicaré más adelante en este tomo; véase sección 26) con su propio programa de investigación para unificar las teorías de campos electromagnéticos y gravitatorios.

INTRODUCCION

LA MECANICA CUANTICA SIN «EL OBSERVADOR»

> Si alguien preguntase, «¿Quién es el más grande de los físicos modernos después de Einstein?», la respuesta sería: Einstein de nuevo... [Porque] si otro hubiera descubierto la relatividad, el resto de sus descubrimientos seguiría haciendo de él el segundo físico de su tiempo.
>
> CORNELIUS LANCZOS

1. TEORIA CUANTICA Y EL PAPEL DEL «OBSERVADOR»

En esta introducción intento exorcizar de la mecánica cuántica al fantasma llamado «conciencia» u «observador» y mostrar que la mecánica cuántica es una teoría tan «objetiva» como, por ejemplo, la mecánica estadística clásica [1]. En el núcleo central de este tomo intentaré justificar mi argumento algo más detalladamente y enunciar mi propia comprensión de estas cuestiones que han atormentado a la teoría cuántica durante los últimos cincuenta años, y enunciaré también mi propio enfoque alternativo.

Mi tesis en esta introducción es que el observador, o mejor, el experimentador, tiene en la física cuántica exactamente la misma función que en la física clásica. *Su tarea es contrastar la teoría.*

La concepción contraria, normalmente llamada *interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica,* es casi universalmente aceptada. En breves palabras, dice que «*la realidad objetiva se ha esfumado» y que la mecánica cuántica no representa partículas, sino más bien nuestro conocimiento, nuestra observación, nuestra conciencia de las partículas* [2].

Si un simple filósofo, como yo, se opone a un dogma dominante, como éste, debe esperar no sólo represalias, sino incluso ridículo y

---

[1] [Este capítulo introductorio es una versión revisada y extendida de un artículo publicado en *Quantum Theory and Reality,* ed. Mario Bunge, 1967, pp. 7-44. Fue escrito en 1966, aproximadamente diez años después que el núcleo central de este tomo. El lema es de C. Lanczos, *Albert Einstein and the Cosmic World Order,* 1965, p. 4. *Ed.*].

[2] *Cp.* Werner Heisenberg, «The Representation of Nature in Contemporary Physics», *Daedalus,* 87, 1958, pp. 95-108; véase p. 100.

desprecio. Puede muy bien ser amendrentado (aunque me alegra recordar la amabilidad y paciencia con que me trató Niels Bohr) con la aserción de que *todos los físicos competentes saben que la interpretación de Copenhague es correcta* (puesto que ha sido «demostrada con experimentos»).

Parece, por tanto, necesario señalar que esta aserción es históricamente errónea, y para ello me referiré a físicos que, como Einstein, Planck, von Laue o Schrödinger, son tan competentes como el que más y que (al contrario que Einstein, Planck, von Laue y Schrödinger) fueron incluso, en algún momento, partidarios plenamente convencidos de la interpretación de Copenhague, pero que ahora ya no «consideran la nueva interpretación concluyente o convincente» como lo expresa Heisenberg [3].

Está, en primer lugar, Louis de Broglie, seguidor, una vez, de la interpretación de Copenhague; y su antiguo discípulo, Jean-Pierre Vigier.

Está, luego, Alfred Landé, también uno de los grandes fundadores de la teoría cuántica en los años de 1921 a 1924, y que, más tarde (1937 y 1951), escribió dos libros de texto sobre mecánica cuántica enteramente en el espíritu de Copenhague, pero que todavía más tarde [4] se convirtió en uno de los principales oponentes de la interpretación de Copenhague.

Está David Bohm, que publicó en 1951 un libro de texto, *Quantum Theory* [5], que, no sólo era ortodoxo en el sentido de Copenhague, sino, además, una de las más claras y completas, más penetrantes y críticas presentaciones del punto de vista de Copenhague que se ha publicado jamás. Poco después, bajo la influencia de Einstein, exploró nuevas vías y en 1952 llegó [6] a una teoría tentativa (revisada más tarde [7]) cuya consistencia lógica demostraba la falsedad del dogma constantemente repetido (debido a von Neumann [8]) de que la teoría cuántica es «*completa*» en el sentido de que debe resultar incompatible con cualquier teoría más detallada.

---

[3] W. Heisenberg, «The Development of the Interpretation of the Quantum Theory», en W. Pauli, ed., *Niels Bohr and the Development of Physics,* 1955, p. 16.

[4] A. Landé, *Foundations of Quantum Theory,* 1955; *From Dualism to Unity in Quantum Mechanics,* 1960; *New Foundations of Quantum Mechanics,* 1965.

[5] D. Bohm, *Quantum Theory,* 1951.

[6] D. Bohm, «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables», *Physical Review,* 48, 1952, pp. 166-79, 180-93.

[7] D. Bohm y J. Bub, «A Proposed Solution of the Measurement Problem in Quantum Mechanics by a Hidden Variable Theory», *Reviews of Modern Physics,* 38, 1966, pp. 453-69.

[8] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics,* 1949, 1955 (edición alemana, 1932).

Está Mario Bunge, que, en 1955, publicó un artículo, «Strife about Complementarity» [9].

Está el físico alemán Fritz Bopp, que suscribe explícitamente la interpretación de Copenhague, en un párrafo epistemológico de un artículo del mayor interés. En él escribe, por ejemplo: «Naturalmente, nuestras consideraciones no suponen ninguna alteración del concepto matemático de complementariedad.» Sin embargo, desarrolla allí (y en otras publicaciones) una teoría con la que difícilmente habría tenido Einstein disputa, puesto que, siguiendo una línea no distinta de la de Einstein, Bopp interpreta el formalismo teórico-cuántico como una extensión de la mecánica estadística clásica; es decir, como una teoría de conjuntos [10].

He dado esta breve lista de disidentes, desde luego, bastante incompleta, simplemente para combatir el mito histórico de que sólo los filósofos (y los físicos totalmente incompetentes o seniles) pueden poner en duda la interpretación de Copenhague. Pero antes de proceder a criticar más detalladamente esta interpretación, me gustaría exponer dos puntos:

a) En un sentido muy importante, que por lo que yo sé, se ha pasado normalmente por alto, la interpretación de Copenhague dejó de existir hace ya mucho tiempo.

b) La mayoría de los físicos que son honestamente partidarios de ella, no la prestan ninguna atención en la práctica.

Respecto al punto *a),* no debemos olvidar que «la nueva teoría cuántica» o la «mecánica cuántica» fue, al principio y por lo menos hasta 1935, simplemente otro nombre de «*la nueva teoría electromagnética de la materia*».

Para entender plenamente cómo la teoría del átomo y, por tanto, la de la materia, se identificaron con la teoría del campo electromagnético, podemos recurrir, por ejemplo, a Einstein, que dijo en 1920 [11]: «... según nuestras concepciones actuales, *las partículas elementales no son... nada más que condensaciones del campo electromagnético*... Nuestra... visión del universo presenta dos realidades..., a saber, éter gravitatorio y campo electromagnético, o —como podrían llamarse también— espacio y materia».

La mecánica cuántica era considerada por sus partidarios como *la forma final de esta teoría electromagnética de la materia.* Es decir,

---

[9] M. Bunge, «Strife About Complementarity», *British Journal for the Philosophy of Science,* 6, 1955, pp. 1-12, 141-54.

[10] F. Bopp, «Statistische Mechanik bei Störung des Zustands eines physikalischen Systems durch die Beobachtung», en F. Bopp, ed., *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit,* 1961, pp. 128-49; véase pp. 147 y ss. Véase también A. Einstein, «Remarks Concerning the Essays Brought Together in this Co-operative Volume», en P. A. Schilpp, ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* 1949, pp. 665-68; *cf.*, pp. 671 y ss.

[11] A. Einstein, *Sidelights on Relativity,* 1922; *cfr.*, p. 22 (el subrayado es mío).

el formalismo se consideraba, en primer lugar, como *la teoría de los electrones y los protones* y, por tanto, como *la teoría de la constitución de los átomos; del sistema periódico de los elementos y de sus propiedades físicas; y del enlace químico, y así, de las propiedades físicas y químicas de la materia.*

Debemos a Robert A. Millikan [12] un enunciado grandioso de la concepción que sostenían casi todos los físicos, por lo menos hasta el descubrimiento del positrón en 1932:

«Realmente, nada tan extraordinariamente simplificador había ocurrido nunca en la historia de la ciencia, como toda la serie de descubrimientos que culminó alrededor de 1914, año en que por fin se aceptó, prácticamente por todos, la teoría de que el mundo material no contiene más que dos entidades fundamentales, a saber, electrones negativos y electrones positivos, exactamente iguales en carga pero muy diferentes en masa, el electrón positivo —que ahora suele llamarse *protón*— 1.850 veces más pesado que el negativo, que ahora suele llamarse simplemente *electrón*».

En realidad, por lo menos hasta 1935, algunos de los físicos más importantes [13] creían que, con el advenimiento de la mecánica cuántica, *la teoría electromagnética había entrado en su estado final* y que los resultados de la mecánica cuántica confirmaban enfáticamente que *toda la materia consistía en electrones y protones.* (Los neutrones y los neutrinos también habían sido admitidos, de no muy buena gana, pero se creía que los neutrones eran protones + electrones; y que los neutrinos podían no ser mucho más que una ficción matemática; mientras que los positrones se consideraban como «agujeros» en el mar de electrones.)

Esta teoría de que la materia consiste en protones y electrones murió hace tiempo. Su enfermedad (aunque al principio permaneció oculta) empezó con el descubrimiento del neutrón y también del positrón (en el que las autoridades de Copenhague se negaron a creer al principio); y recibió el golpe de gracia con el descubrimiento de los claramente distintos *niveles de interacción* de los que las fuerzas electromagnéticas constituyen sólo uno entre, por lo menos, cuatro:

1. Fuerzas nucleares (fuerte interacción).
2. Fuerzas electromagnéticas.
3. Interacciones débiles de desintegración.
4. Fuerzas de gravitación.

Además, prácticamente se ha perdido la esperanza de resolver, dentro de la mecánica cuántica, problemas clásicos de la teoría electromagnética tales como la explicación de la carga electrónica.

---

[12] R. A. Millikan, *Time, Matter and Values,* 1932, p. 46 (el subrayado es mío); *cf.,* también su *Electrons (+ and —), Protons, Photons, Neutrons and Cosmic Rays,* 1935, p. 377.

[13] *Cf.* A. Eddington, *Relativity Theory of Protons and Electrons,* 1936.

En vista de esta situación, podemos volver a considerar la lucha titánica entre Einstein y Bohr. El problema que planteó Einstein fue si la mecánica cuántica era «*completa*». Einstein dijo que no. Bohr dijo que sí [14].

No tengo la menor duda de que Einstein tenía razón. Pero aún hoy leemos que fue Bohr quien ganó la famosa batalla. Esta opinión persiste en gran medida porque el ataque de Einstein a la aserción de Bohr sobre la *completud* de la mecánica cuántica se interpretó por la escuela de Copenhague como un ataque *a la propia mecánica cuántica y a su «corrección» o consistencia. Pero esto entraña que aceptemos: 1) la identificación de la interpretación de Copenhague con la teoría cuántica, y 2) el cambio que hizo Bohr del problema de completud* a *corrección (= ausencia de contradicción).* Sin embargo, Einstein, al ofrecer su propia interpretación (estadística) de la teoría cuántica, había aceptado claramente el hecho de su consistencia.

Respecto al punto *b)*, es decir, a mi afirmación de que la mayoría de los físicos que creen honradamente en la interpretación de Copenhague no le prestan la menor atención en la práctica real, Fritz Bopp [15] constituye un ejemplo excelente, ya que cree (como Einstein, Podolsky y Rosen) que las partículas poseen al mismo tiempo posiciones y momentos nítidos, mientras que la escuela de Copenhague cree que esto es falso o «carente de sentido» o «no físico». Citaré una formulación de Landé de 1951 (antes de que se rebelase contra la interpretación de Copenhague) [16]: «La idea clásica de las partículas se desmorona bajo el impacto de las relaciones de incertidumbre. No es físico aceptar la idea de que *existen* partículas que poseen posiciones y momentos definidos en cualquier momento de tiempo dado y luego conceder que esos datos no pueden ser confirmados nunca experimentalmente, como por un maligno capricho de la naturaleza.» Pero lo que tengo en mente sobre todo, en relación con mi punto *b)* es esto: hay que admitir que los físicos siguen aplicando el formalismo de la mecánica cuántica a los viejos problemas y los métodos del formalismo, con muchas modificaciones, se usan en parte en relación con los muchos problemas nuevos de la teoría nuclear y de la teoría de las partículas elementales. Esto es, por cierto, un reconocimiento claro de su fuerza. Sin embargo, al mismo tiempo, la mayoría de los *experimentadores,* aunque muy preocupados por los límites de la preci-

---

[14] *Cf.* A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review,* 47, 1935, p. 777-80, y N. Bohr, «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review,* 48, 1935, pp. 696-705.

[15] F. Bopp, *op. cit.* (véase la nota 10, *supra*).

[16] A. Landé, *Quantum Mechanics,* 1951, p. 42. Landé continúa citando el artículo de N. Bohr, «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory», *Nature,* 121, 1928, pp. 580-590.

sión de sus resultados, no parecen estar más preocupados respecto a la función del observador o respecto a su interferencia con los resultados de lo que lo están cuando se trata de experimentos clásicos delicados y la mayoría de los *teóricos* están bastante convencidos de que se necesita una teoría nueva y mucho más general: todos ellos parecen estar buscando una *nueva teoría realmente revolucionaria.*

A pesar de todo ello, todavía sigue pareciendo necesario *discutir* la interpretación de Copenhague; es decir, más exactamente, la afirmación de que, en teoría atómica, tenemos que considerar al «*observador*» o al «*sujeto*» como especialmente importante, porque la teoría atómica adquiere, en gran medida, su carácter peculiar de *la interferencia del sujeto o del observador (y de sus «medios de medir») con el objeto físico que se investiga.* Citaré un enunciado típico de Bohr [17]: «Realmente, *la interacción finita entre el objeto y los medios de medir...* entraña la necesidad de una renuncia definitiva al ideal clásico... y una reconsideración radical de nuestra actitud frente al problema de la realidad física.»

De la misma manera habla Heisenberg [18]: «... el requisito tradicional de la ciencia... permite una división del mundo en sujeto y objeto (observador y observado)... esta suposición no es permisible en física atómica; la interacción entre el observador y el objeto causa grandes cambios incontrolables en el sistema [que está] en observación, debido a los cambios discontinuos característicos de los procesos atómicos». Por tanto, Heisenberg sugiere [19] que «es ahora provechoso reexaminar la discusión fundamental, tan importante para la epistemología, de la dificultad de separar los aspectos subjetivos y objetivos del mundo».

Frente a todo esto, yo sugiero que, en la práctica, los físicos efectúan mediciones y hacen experimentos, hoy, fundamentalmente de la misma manera en que los hacían antes de 1925. Si hay una diferencia importante, entonces es porque ha aumentado el grado de indirección de las mediciones, tanto como el grado de «objetividad». Donde hace treinta o cuarenta años los físicos miraban por un microscopio para hacer una «lectura» tal como un recuento de centelleos, hay ahora películas fotográficas o contadores automáticos que hacen la «lectura». Y aunque las películas fotográficas y las lecturas de los contadores tienen que interpretarse (a la luz de una teoría, como ocurre con todos los experimentos o las observaciones), de ninguna forma se «in-

[17] N. Bohr, «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», en P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* 1949; *cf.* pp. 232 y ss.

[18] *Cf.* W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory,* 1930, pp. 2 y ss.

[19] W. Heisenberg, *op. cit.*, p. 65; véase también J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics,* 1949, 1955, pp. 418-21.

terfiere» físicamente con ellos o se les «influencia» con nuestras interpretaciones teóricas. Admitámoslo, muchas contrastaciones experimentales tiene ahora un carácter principalmente estadístico, pero eso no las hace menos «objetivas»: su carácter estadístico (a menudo elaborado automáticamente por contadores y ordenadores) no tiene nada que ver con la supuesta intrusión del observador o del sujeto o de la conciencia en la física. Por el contrario, la preparación o el plan de un experimento siempre ha tenido, y continúa teniéndolo, mucho que ver con nuestro cambiante conocimiento: *depende de la teoría.*

Nuestras *teorías,* que nos guían en la disposición de nuestros experimentos y en la interpretación de sus resultados, han sido siempre, naturalmente, invenciones nuestras: son invenciones o productos de nuestra «conciencia». Pero eso no tiene nada que ver con la condición científica de nuestras teorías, que depende de factores tales como su simplicidad, simetría y capacidad explicatoria y de la forma en que ha resistido la discusión crítica y las contrastaciones experimentales cruciales; y de su verdad (correspondencia con la realidad) o su proximidad a la verdad [20].

2. TEORIAS CONTRA CONCEPTOS

Quizá sea éste el mejor lugar para introducir algunas observaciones lógicas sobre *la distinción entre teorías y conceptos;* observaciones que, aunque lo que sigue a continuación no depende de ellas, pueden, sin embargo, contribuir a eliminar algunos obstáculos que cierran el camino hacia un entendimiento crítico de la situación en la teoría cuántica.

Lo que estamos buscando, en ciencia, son *teorías verdaderas* —enunciados verdaderos, descripciones verdaderas de ciertas propiedades estructurales del mundo en que vivimos. Estas teorías o sistemas de enunciados pueden tener utilidad instrumental; sin embargo, lo que buscamos en ciencia no es tanto la utilidad como la *verdad: aproximación a la verdad; capacidad explicativa y la capacidad de resolver problemas;* y, por tanto, *entendimiento.*

Así pues, es erróneo describir las teorías como *nada más* que instrumentos (por ejemplo, instrumentos de predicción), aunque, por lo general, son también, entre otras cosas, instrumentos útiles. Infinitamente más importante para el científico que la cuestión de la utilidad de las teorías es la de su *verdad objetiva,* o su proximidad a la verdad, y el tipo de *entendimiento* del mundo y de sus problemas que

[20] *Cf.* mi *El desarrollo del conocimiento científico: Conjeturas y Refutaciones [C. & R.,* 1963, 1972], capítulo 10, y mi *Conocimiento Objetivo [Obj. Kn.,* 1972], capítulo 2.

pueden poner a nuestro alcance. La perspectiva de que las teorías no son *nada más* que instrumentos o artificios para calcular [21], se ha puesto de moda entre los teóricos cuánticos, debido a la doctrina de Copenhague de que la teoría cuántica es *intrínsecamente ininteligible* porque sólo podemos entender *«imágenes» clásicas,* tales como las «imágenes de partículas» o las «imágenes de ondas». Yo creo que ésta es una doctrina equivocada e incluso perversa.

También se describe a las teorías, erróneamente, como «sistemas conceptuales» o «marcos conceptuales». Es verdad que no podemos construir teorías sin usar palabras o, si se prefiere el término, «conceptos». Pero es de enorme importancia distinguir entre enunciados y palabras, entre teorías y conceptos. Y es importante darse cuenta de que es un error pensar que una teoría T_1 utilizará *inevitablemente* un cierto sistema conceptual C_1: Una teoría T_1 puede ser formulada de muchas formas y puede usar muchos sistemas conceptuales diferentes, digamos C_1 y C_2. O dicho de otro modo: dos teorías, T_1 y T_2, deben ser consideradas como una sola si son lógicamente equivalentes, aunque puedan usar dos «sistemas conceptuales» totalmente distintos (C_1 y C_2) o estén concebidas en «marcos conceptuales» totalmente diferentes.

Resulta que yo no creo que Schrödinger [22] y Eckart [23] hayan establecido con validez la plena equivalencia lógica de la mecánica ondulatoria y de la mécanica matricial; parece haber algunos agujeros en esas pruebas de equivalencia. Sobre este punto, estoy de acuerdo con Norwood Russell Hanson [24] (y E. L. Hill [25]), aunque mis concepciones sobre la lógica de la equivalencia o identidad de las teorías difieren algo de las de Hanson. Sin embargo, no creo que sea imposible tal prueba, *a pesar de la gran diferencia entre los marcos conceptuales de las dos teorías.* (Lo que se necesitaría para una prueba válida sería algo que se aproximase a una axiomatización de las dos teorías, y una prueba de que a cada teorema $t_{1,n}$ de T_1 corresponde un teorema $t_{2,n}$ de T_2 (y viceversa) de tal modo que, con ayuda de algún sistema de definiciones de los conceptos de T_1 y T_2 pudiésemos mostrar que $t_{1,n}$ y $t_{2,n}$ son lógicamente equivalentes. No sería necesario que T_1 ni T_2 contuviesen en sí mismas los medios necesarios para formular esas definiciones; porque algunas *extensiones* de las teorías po-

---

[21] *Cp.* mi *El desarrollo del conocimiento científico [C. & R.],* cap. 3.

[22] E. Schrödinger, «Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der Meinen», *Annalen der Physik* 79, 1926, pp. 734-56.

[23] C. Eckart, «Operator Calculus and the Solution of the Ecuations of Quantum Dynamics», *Physical Review,* 28, 1926, pp. 711-26.

[24] N. R. Hanson, «Are Wave Mechanics and Matrix Mechanics Equivalent Theories?», en H. Feigl y G. Maxwell, eds., *Current Issues in the Philosophy of Science,* 1961, pp. 401-25.

[25] E. L. Hill, «Comments on Hanson's "Are Wave Mechanics and Matrix Mechanics Equivalent Theories?"», en H. Feigl y G. Maxwell, eds., *op. cit.,* pp. 425-8.

drían proporcionar esos medios. A propósito, el hecho de que puedan necesitarse definiciones para tal prueba de equivalencia no significa que sean necesarias dentro de una teoría física.)

Ahora bien, como las teorías *pueden* ser equivalentes incluso aunque los marcos conceptuales que las «sustentan» sean totalmente diferentes (hay muchos otros ejemplos que muestran que eso es posible), es claramente un error identificar una teoría con el marco conceptual que la «sustenta» o incluso creer que los dos *deben* relacionarse muy estrechamente. El marco conceptual de una teoría *puede* ser sustituido por uno muy diferente sin cambiar la teoría en nada esencial; y viceversa: teorías incompatibles *pueden* expresarse dentro del mismo marco conceptual. (Por ejemplo, si sustituimos la ley inversa del cuadrado por una ley inversa con la potencia 2,0001, entonces tenemos una teoría diferente dentro del mismo marco conceptual; y la diferencia aumentará si aumenta la diferencia entre los dos parámetros. Incluso podríamos introducir en la teoría de Newton una velocidad finita para las interacciones gravitatorias y seguir diciendo que estamos operando dentro del mismo marco conceptual. Si la velocidad es muy grande, es posible que las dos teorías no se distingan experimentalmente; si es pequeña, las teorías pueden diferir ampliamente en sus implicaciones empíricas, aunque sigan estando dentro del mismo marco conceptual.)

Aunque los conceptos tengan una gran capacidad de sugerencia, e influyan así en el desarrollo posterior de la teoría, *no es el sistema conceptual sino la teoría* la que tiene importancia real para el científico puro. Y la teoría no es simplemente un «instrumento» para él, es más: él está interesado en su verdad o su aproximación a la verdad [26]. El sistema conceptual, por otro lado, es intercambiable y es uno entre los varios instrumentos posibles que pueden usarse para formular la teoría. El sistema conceptual proporciona simplemente un lenguaje para la teoría; quizá un lenguaje mejor y más simple que otro, quizá no. En cualquier caso, sigue siendo (como todo lenguaje) vago e impreciso hasta cierto punto. No puede hacerse «preciso»: el significado de los conceptos no puede establecerse, esencialmente, por medio de ninguna definición, sea formal, operacional u ostensiva. Cualquier intento de hacer «preciso» el significado del sistema conceptual por medio de definiciones tiene que llevar a una retrogresión infinita y a una precisión meramente *aparente,* que es la peor forma de imprecisión, porque es la forma más engañosa [27]. (Esto es válido incluso para la matemática pura.)

---

[26] *Cf.* mi *Desarrollo del conocimiento científico [C. & R.],* cap. 10; y el nuevo Apéndice II, publicado por primera vez en la 5.ª edición revisada de *Conocimiento objetivo [Obj. Kn.,* 1979].

[27] [Véase *La sociedad abierta y sus enemigos [O. S.,* 1945], capítulo 11, sección 2; y *Búsqueda sin término [U. Q.,* 1974, 1976], sección 7, *Ed.*].

Así pues, en último término, nos interesan las teorías y su verdad, más que los conceptos y su significado.

Este punto, sin embargo, raras veces se ve claro. Heinrich Hertz dijo (y Wittgenstein lo repitió) que en ciencia nos creamos «imágenes» *(«Bilder»)* para nosotros mismos, de los hechos o de la realidad; y dijo que escogemos nuestras «imágenes» de tal manera que «las consecuencias necesariamente lógicas» *(«die denknotwendigen Folgen»)* de las «imágenes» estén de acuerdo con las «consecuencias necesariamente naturales» *(«die naturnotwendigen Folgen»)* de los objetos y los hechos reales. Aquí queda abierta la cuestión de si las «imágenes» son teorías o conceptos. Mach, al hablar de Hertz [28], sugirió que debíamos interpretar las «imágenes» de Hertz como «conceptos». La concepción de Bohr parece similar, cuando habla (como lo hace muy a menudo) de *«la imagen corpuscular»* y de la *«imagen ondulatoria»;* en realidad, su forma de hablar indica claramente la influencia (por lo menos indirecta) de Hertz y Mach.

Pero las «imágenes» no tienen importancia. Tienen especialmente poca importancia si son más o menos sinónimas de los «conceptos» y casi igual de poca importancia si se pretende que representen teorías. *Una teoría no es una imagen.* No necesita ser «entendida» por medio de «imágenes visuales»: *entendemos una teoría si entendemos el problema para cuya solución se ha concebido y si entendemos la forma en que lo resuelve mejor, o peor, que sus competidoras.* Algunas personas combinarán este tipo de entendimiento con imágenes visuales, otras no. Pero la visualización más vívida no equivale a la comprensión de una teoría a menos que se cumplan las demás condiciones: una comprensión de la situación del problema y de los argumentos en favor y en contra de las teorías rivales.

Estas consideraciones son importantes a causa de la charla incesante sobre la «imagen corpuscular» y la «imagen ondulatoria» y su supuesta «dualidad» o «complementariedad» y sobre la supuesta necesidad, afirmada por Bohr, de usar «imágenes clásicas» a causa de la (admitida pero no pertinente dificultad, o quizá imposibilidad, de «visualizar» y, por tanto, «entender» los objetos atómicos. Pero *ese* tipo de «entendimiento» tiene escaso valor; y el negar que podamos entender la teoría cuántica ha tenido repercusiones muy sorprendentes tanto sobre su enseñanza como sobre la comprensión real de la teoría.

De hecho, toda esta charla sobre imágenes no tiene la más mínima relación con la física, ni con las teorías físicas, ni con el entendimiento de las teorías físicas. Y la tesis de moda de que el intento de «entender» las teorías físicas modernas es vano, puesto que son esen-

[28] E. Mach, *The Science of Mechanics,* quinta edición, 1941 (la primera edición alemana, 1883); *cp.* p. 318.

cialmente «ininteligibles» (aunque son instrumentos útiles de cálculo) equivale a la afirmación absurda de que no podemos saber qué problemas tratan de resolver esas teorías o por qué los resuelven mejor, o peor, que las teorías rivales.

Si los *conceptos* son relativamente poco importantes en comparación, las *definiciones* deben ser también poco importantes. Así pues, aunque estoy abogando aquí en favor del *realismo* en física, no pienso definir «realismo» ni «realidad». Al abogar aquí en favor del realismo en física quiero, sobre todo, argüir que nada ha cambiado desde Galileo, Newton o Faraday respecto a la condición o la función del «observador» o de nuestra «conciencia» o de nuestra «información» en la física. Al mismo tiempo, estoy dispuesto a señalar que incluso en la física de Newton, el «espacio» era algo menos real que la «materia» (porque aunque actuaba sobre la materia, no se podía actuar sobre él); y que en la teoría de la relatividad especial de Einstein, un marco de inercia era menos real que la coincidencia espacio-temporal de dos sucesos, o que la distancia espacio-temporal entre ellos. De una manera similar, el número de grados de libertad de un sistema físico es una idea más abstracta, y quizá menos real, que los átomos o las moléculas que constituyen el sistema. Pero, aún así, yo me opondría a decir que los grados de libertad de un sistema no son reales, que *no* son *más que* un artificio conceptual y no una *propiedad física* real *del sistema*. Sin embargo, no trato de argüir sobre palabras, incluida la palabra «real», aunque, en conjunto, considero excelente la sugerencia de Landé de que llamemos físicamente real a lo que sea «susceptible de recibir patadas» (y capaz de devolver la patada cuando se le da una). Sin embargo hay, me inclino a pensar, grados de pateabilidad: no podemos dar patadas a los quasars, como me recuerda David Bohm [29].

3. TRECE TESIS

He estado dudando si no debería, quizá, empezar por analizar y criticar los dogmas centrales de la interpretación de Copenhague, y mostrar después que es posible una interpretación perfectamente realista de la teoría cuántica. He decidido seguir un curso diferente. Voy a exponer, en forma de trece tesis y un resumen, mi propia interpretación realista, en lo que vale; y criticaré la interpretación de Copenhague en el curso de mi exposición. Estoy seguro de que escandalizaré a muchos físicos que, al llegar a mi cuarta tesis, o a la sexta como mucho, dejarán de leer esta basura: por ayudarles a ellos a no perder el tiempo, es por lo que he decidido seguir este procedimiento.

[29] [Véase *El yo y su cerebro, (S. & I. B.,* 1977), capítulo P1, sección 4. *Ed.*].

1. Mi primera tesis se refiere a la cosa más importante para comprender la teoría cuántica: el tipo de *problemas* que se supone que resuelve la teoría. Estos, afirmo, son esencialmente *problemas estadísticos. a)* Lo fue el problema de Planck en 1897-1900, que llevó a su fórmula de radiaciones. *b)* Lo fue la hipótesis de Einstein sobre el fotón y su derivación de la fórmula de Planck. *c)* Lo fue (al menos en parte) el problema de Bohr en 1913, que le llevó a su teoría de las emisiones del espectro: la explicación del principio de combinación de Rydberg-Ritz era, claramente, un problema estadístico (sobre todo después de que Einstein hubiera propuesto su hipótesis del fotón). Admitamos que había un segundo problema, que Bohr consideró *el* fundamental: el problema de la *estabilidad atómica* o del estado fundamental estacionario de los electrones del átomo que no emiten radiaciones. Bohr «resolvió» este problema —por medio de un postulado (de «estados cuánticos» u «órbitas preferidas»). En la medida en que hay una solución *explicativa* de este problema, se debe a De Broglie y a la mecánica de ondas; lo que *a la luz de la interpretación de Born* significa que se debe a la sustitución de un problema estadístico por un problema mecánico. (Véase más adelante.) *d)* Lo fue el conjunto de problemas que se resolvieron, por primera vez, por medio del muy fructífero «principio de correspondencia» de Bohr: eran, principalmente, problemas de las *intensidades* de las rayas del espectro emitidas. Sin embargo, los argumentos de correspondencia de Bohr eran, en gran medida, cualitativos o, en el mejor de los casos, aproximaciones. El problema central que llevó a la nueva mecánica cuántica era perfeccionar esto obteniendo resultados estadísticos exactos.

Esta, sin embargo, no es en absoluto la manera en que Bohr y su escuela consideraban el problema. *No* buscaban una generalización de la mecánica *estadística* clásica, sino más bien una «*generalización de la mecánica clásica* [de partículas] adecuadas para permitir la existencia del cuanto de acción» como lo expresó Bohr tan tarde como 1948 [30]; una generalización de la mecánica de partículas que ofreciera «un marco suficientemente amplio para dar razón de... los rasgos característicos de la *estabilidad atómica que dio el primer impulso al desarrollo de la mecánica cuántica...*».

La mayor parte de las formulaciones del *problema* de la mecánica cuántica que yo he podido encontrar son similares, excepto, quizá, las «inductivistas» que parten de los experimentos y consideran a la teoría como «el intento de clasificar y sintetizar los resultados... del experimento científico» [31], como si los referidos experimentos científ-

[30] N. Bohr, «On the Notions of Causality and Complementarity», *Dialectica*, 2, 1948, pp. 312-19; *cf.*, p. 316 (los subrayados son míos).

[31] *Cf.* W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, 1936, p. 1; y «Uber quantentheoretische Kinematik und Mechanik», *Matematische Annalen*, 95, 1926, pp. 683-705.

ficos no fuesen, principalmente, sólo los resultados de problemas teóricos y como si su significación no estribase sólo en su conflicto con alguna teoría o en su apoyo de otra. (Una actitud igualmente inductivista parece ser el punto de partida de Dirac, cuando expone la «necesidad de una teoría cuántica» [32].)

Tengo que admitir, sin embargo, que el programa de Bohr (equivocado, en mi opinión) de reformar la mecánica de partículas para resolver el problema de la estabilidad atómica parecía tener ciertas perspectivas de realizarse con éxito entre 1924 y 1926. Me refiero, naturalmente, a la tesis doctoral de De Broglie de 1923-24 en la que aplicaba a los electrones la idea einsteiniana de que los fotones estaban de alguna manera «asociados» con las ondas y mostraba que las «órbitas preferidas» que Bohr cuantizaba (y con ellas, la estabilidad) podían explicarse por interferencia de ondas. Esta era, sin duda, una de las ideas más atrevidas, profundas y transcendentes de toda esta historia.

La idea de De Broglie era, bastante conscientemente, una inversión de la idea de Einstein de asociar los cuantos de luz o fotones con las ondas luminosas. En la teoría de Einstein, que era, pues, el modelo de la de De Broglie, la luz es emitida y absorbida en forma de «partículas» o «cuantos de luz» o «fotones»; y, por tanto, en la forma de las cosas que tienen una localización espacio-temporal bastante exacta, al menos mientras *interactúan con la materia* al ser emitidas o absorbidas. La luz, sin embargo, se *propaga* como ondas. El cuadrado de la amplitud de esas ondas determina, según Einstein, la densidad (es decir, la probabilidad estadística) de los fotones; y la amplitud de las ondas en el lugar en que se encuentra un átomo (en un estado apropiado) o un electrón libre, determina la probabilidad de la absorción de un fotón.

Sin embargo, pasaron más de dos años, durante los cuales la teoría de los electrones de De Broglie se convirtió en la «mecánica de ondas» de Schrödinger, antes de que Max Born aplicase a esta nueva mecánica de ondas la interpretación estadística de la relación entre fotones y ondas luminosas que debemos a Einstein. El propio Max Born dice de su interpretación estadística de la mecánica ondalutoria [33]: «La solución... fue sugerida por una observación de Einstein sobre la conexión entre la teoría ondulatoria de la luz y la hipótesis del fotón. La intensidad [por supuesto, lo que quiere decir es el cuadrado de la amplitud] de las ondas luminosas iba a ser una me-

[32] *Cf.* P. A. M. Dirac, «The Need for a Quantum Theory», en *The Principles of Quantum Mechanics,* cuarta edición, 1958, pp. 1 y ss.

[33] M. Born, «Bemerkungen zur statistischen Deutung der Quantenmechanik», en F. Bopp, ed., *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit,* 1961, pp. 103-118; *cp.*, p. 104.

dida de la densidad de los fotones o, más exactamente, de la probabilidad de que hubiera fotones presentes.»

Así, debido a la interpretación estadística de Born de las ondas de materia, incluso el único problema de la teoría cuántica que parecía no ser estadístico —el problema de la estabilidad atómica— fue reducido a un problema estadístico o sustituido por uno: las «órbitas preferidas» cuantizadas de Bohr resultaron ser aquéllas para las que la *probabilidad* de la presencia de un electrón difería significativamente de cero.

Todo esto apoya mi tesis de que *los problemas de la nueva teoría cuántica eran esencialmente de carácter estadístico o probabilístico.*

2. Mi segunda tesis es que *las cuestiones estadísticas exigen, esencialmente, respuestas estadísticas.* Así pues, la mecánica cuántica tiene que ser, esencialmente, una teoría estadística.

Creo que este argumento (aunque su validez no es, de ningún modo, admitida por todos) es perfectamente directo y lógicamente convincente. (El argumento proviene de Richard von Mises [34] y de mi *L.I.C.;* lo ha ilustrado estupendamente Alfred Landé [35].)

Las conclusiones estadísticas no pueden obtenerse sin premisas estadísticas. Y por tanto, las soluciones estadísticas no pueden obtenerse sin una teoría estadística.

Sin embargo, debido en gran medida a que los *problemas* de la teoría no se consideraban estadísticos (y a menudo siguen sin ser considerados estadísticos), se inventaron otras razones para explicar el carácter estadístico, generalmente admitido, de la teoría.

De la mayor importancia, entre esas razones, es el argumento de que es nuestra (necesaria) *carencia de conocimiento* —sobre todo, las limitaciones a nuestro conocimiento descubiertas por Heisenberg y formuladas en su «*principio de indeterminación*» o «*principio de incertidumbre*» —la que nos obliga a adoptar una teoría probabilista y, en consecuencia, estadística. (Critico este argumento en mi quinta tesis, más adelante.)

3. Mi tercera tesis es que es una creencia errónea que tengamos que explicar el carácter probabilista de la teoría cuántica acudiendo a nuestra (supuestamente necesaria) *carencia de conocimiento,* en lugar de hacerlo por el carácter estadístico de nuestros problemas, y que eso ha llevado a la *intrusión del observador, o del sujeto, en la teoría cuántica.* Ha llevado a esta intrusión porque la concepción de que una

[34] R. von Mises, *Probability, Statistics and Truth,* 1939 (primera edición alemana, 1928, tercera, 1951).

[35] A. Landé, *Foundations of Quantum Theory,* 1955, pp. 3 y ss.; *New Foundations of Quantum Mechanics,* 1965, pp. 27 y ss. y 39.

teoría probabilista es el resultado de la falta de conocimiento lleva, inescapablemente, a *la interpretación subjetivista de la teoría de la probabilidad;* es decir, a la concepción según la cual la probabilidad de un suceso mide el grado de conocimiento (incompleto) de alguien sobre ese suceso, o su grado de «creencia» en él.

Sin embargo, llevo muchos años tratando de mostrar que sería pura magia si fuésemos capaces de obtener conocimiento —conocimiento estadístico— a partir de la ignorancia [36].

4. Mi cuarta tesis es que, como consecuencia, nos enfrentamos a lo que llamaré *el gran embrollo cuántico.* (Me parece a mí que el único seguidor del «Principio de Complementariedad» de Bohr que está libre del embrollo —siguiendo casi exactamente las menospreciadas ideas de Einstein con nuevo ropaje— es Fritz Bopp [37].)

Para explicar este gran embrollo, tendré que decir unas palabras sobre las teorías estadísticas.

Toda teoría probabilista o estadística supone lo siguiente:

a) Ciertos *sucesos* (que salga el 5) que les ocurren a ciertos *elementos* (los dados) en ciertas *situaciones experimentales* (la de ser sacudidos en un cubilete y echados sobre una mesa). Ellos constituyen la «población» de nuestras estadísticas.

b) Ciertas propiedades físicas de esos sucesos, elementos y situaciones experimentales; por ejemplo, que los dados son de un material homogéneo, y que sólo uno de los seis dados está marcado con un «5», y que la situación experimental permite una cierta amplitud de variación.

c) Un conjunto de los sucesos *posibles (posibles* bajo las condiciones experimentales), llamados puntos en el *espacio muestral* o *espacio probabilístico* (la noción proviene de Richard von Mises).

d) Un número correspondiente a cada punto (o en el caso de un espacio muestral continuo, a cada región) del espacio muestral, determinado por una función matemática llamada función de distribución. (La suma de esos números es igual a 1; esto puede lograrse mediante una «normalización».) En el caso de un espacio muestral continuo, la función de distribución es una función de densidad.

---

[36] *Cf.* mi *Lógica de la investigación científica [L. Sc. D.]* (primera edición alemana, 1934; segunda, 1966); «Probability Magic, or Knowledge out of Ignorance», *Dialectica,* 11, 1957, pp. 354-74; «The Propensity Interpretation of Probability», *British Journal for the Philosophy of Science,* 10, 1959-60, pp. 25-42; y «The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability, and the Quantum Theory», en S. Körner, ed., *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics,* 1962, pp. 65-70, 88-89. Véase también *Realismo y el objetivo de la ciencia [R. & A. of Sc.],* tomo I de este *Post Scriptum,* especialmente la Parte II.

[37] *Cf.* su artículo citado en la nota 10, anteriormente.

Ejemplo: nuestro espacio muestral puede ser el Reino Unido o, más concretamente, el conjunto de sucesos de un hombre o una mujer que viven en algún punto del Reino Unido. La función de distribución puede ser dada por una distribución de densidad (continua, normalizada a 1) de la población; es decir, el número real de gente que vive en una región, «normalizado» al dividirlo por la población total del Reino Unido. Entonces podemos decir que esta *información* nos ayuda a responder a todas las preguntas del tipo: ¿Cuál es la probabilidad de que un inglés viva en un punto (región) determinado?, ¿o de que un inglés viva en «el sur de Inglaterra»? (aquí suponemos que tenemos una división adecuada de Norte y Sur).

Ahora está claro que la función de distribución estadística (esté o no normalizada) puede considerarse una *propiedad que caracteriza el espacio muestral* —en nuestro caso, al Reino Unido. *No* es una propiedad física característica de los *sucesos* (de que salga el 5; o de que Mr. Henry Smith —residente del Reino Unido— tenga su domicilio en Oxford); aún es menos una propiedad de los elementos (el dado; Mr. Smith).

Esto es especialmente claro respecto a Mr. Smith: para la teoría estadística, él no es más que un elemento a considerar. (De hecho, la teoría estadística nos dirá aproximadamente lo mismo sobre, digamos, su cama o su reloj de pulsera: la distribución estadística de esos elementos tan diferentes físicamente será idéntica). Quizá sea menos claro respecto al dado: en este caso, la función de distribución está *relacionada,* conjeturamos, con sus propiedades físicas (el hecho de tener seis lados, la homogeneidad del material). Sin embargo, esta relación no es tan estrecha como puede parecer a primera vista. Porque la función de distribución será la misma para dados grandes o pequeños, para dados hechos de un plástico ligero o de uranio. Y la probabilidad de que salga 5 será la misma para todos los dados que tengan un solo lado marcado con «5» —sean cuales fueren las marcas de los otros lados (aunque esas marcas pueden influenciar en gran manera otras probabilidades); y la probabilidad será distinta para todos los lados que tengan más de un lado, o menos de un lado, marcado con «5», o para los dados que no sean homogéneos.

Ahora bien, lo que yo llamo el gran embrollo cuántico consiste en tomar una función de distribución, es decir, una función de medida estadística, que caracterice a algún *espacio muestral* (o quizá a alguna «población» de sucesos) y tratarla como si fuese *una propiedad física de los elementos de la población. Es* un embrollo: el espacio muestral no tiene nada que ver con los elementos. No hay relación simétrica y, por tanto, no hay «dualidad» entre partículas y ondas o entre partículas y su campo correspondiente.

Desgraciadamente, mucha gente, incluidos los físicos, hablan como si la función de distribución (o su forma matemática) fuese una

propiedad de los *elementos* de la población en cuestión. No distinguen entre categorías o tipos de cosas totalmente diferentes y se basan en la suposición nada prudente de que «mi» probabilidad de vivir en el sur de Inglaterra es, como «mi» edad, una de «mis» propiedades —quizá una de mis propiedades físicas.

Ahora bien, mi tesis es que este embrollo está muy generalizado en la teoría cuántica, como lo muestran los que hablan de una «dualidad de partícula y onda» o de «ondículas».

Porque la llamada «onda» —la función Ψ— puede ser identificada con la forma matemática de una función, *f(P,dP/dt),* que es una *función de una función de distribución probabilística P,* donde $f = \Psi = \Psi(q,t)$, y $P = /\Psi/^2$ es una función de distribución de densidad. (Véase, por ejemplo, la nota 6, con una referencia a E. Feenberg, en la excelente exposición H. Mehlberg de las concepciones de Landé [38].) Por otro lado, el *elemento* en cuestión tiene las propiedades de una partícula. La forma de onda (en el espacio de configuración) de la función Ψ es, desde este punto de vista, una especie de accidente que plantea un problema a la teoría de la probabilidad, pero que no tiene casi nada que ver con las propiedades físicas de las partículas. Es como si a mí me llamasen «gaussiano» o «no-gaussiano» para indicar que la función de distribución del hecho de que yo viva en el sur de Inglaterra tiene una forma gaussiana o no-gaussiana (en un espacio muestral apropiado).

5. Mi quinta tesis se refiere a las famosas fórmulas de Heisenberg [38a]:

$$(1) \qquad \Delta E \, \Delta t \geq h,$$
$$(2) \qquad \Delta P_x \, \Delta q_x \geq h.$$

[38] H. Mehlberg, «Comments on Landé's "From Duality to Unity in Quantum Mechanics"», en H. Feigl y G. Maxwell, eds., *Current Issues in the Philosophy of Science,* 1961, pp. 360-70.

[38a] [*(Añadido en 1981). A menudo se afirma ahora que la primera de esas relaciones

$$\Delta E \, \Delta t \approx h$$

es incorrecta, inválida y qué sé yo, porque t no es un operador, y se ha afirmado incluso que «Δt» es un símbolo sin sentido (como si yo no pudiese abrir el obturador de mi cámara fotográfica durante el período $\Delta t = 1/100$ segundos; o emitir una señal luminosa de la misma longitud de tiempo). Incluso el argumento puramente formal de que el tiempo no es un operador ya no es válido (*Cp.* Prigogine, *From Being to Becoming,* 1980, pp. 206-231). Pero aún hay más.

Las relaciones de Heisenberg (las relaciones de indeterminación o incertidumbre, o, como las interpreto yo, las «relaciones estadísticas de dispersión» (véase *L.I.C.*, pp. 211, 214-217) son, en efecto, parte del formalismo de la mecánica cuántica; pero en los argu-

Estas fórmulas son, sin ninguna duda, *fórmulas estadísticas* válidamente derivables de la teoría cuántica. Pero han sido *malinterpretadas habitualmente* por aquellos teóricos cuánticos que han dicho que estas fórmulas podían interpretarse como determinantes de ciertos límites superiores a la *precisión de nuestras mediciones* (o a ciertos límites inferiores a su imprecisión).

Mi tesis es que esas fórmulas establecen ciertos límites inferiores a la *dispersión estadística* de los resultados de sucesiones de experimentos: son *relaciones estadísticas de dispersión*. Por ello limitan la precisión de ciertas *predicciones* individuales.

Pero también afirmo que *para contrastar esas relaciones de dispersión tenemos que ser capaces (y lo somos) de efectuar mediciones que sean mucho más precisas que la extensión o amplitud de la dispersión.*

La situación es ésta: una teoría estadística puede decirnos algo sobre la distribución o dispersión de la población en los alrededores de las ciudades industriales. Para *contrastarlo* será necesario fijar los lugares donde vive la gente con una precisión que exceda en mucho la extensión de la dispersión predicha. Nuestras leyes estadísticas pueden decirnos que no podemos reducir la dispersión por debajo de cierto límite. Pero concluir de ahí que somos incapaces de «medir» las posi-

---

mentos de Heisenberg y Bohr y, sobre todo, también en sus discusiones con Einstein, como relata Heisenberg en *Physics and Beyond,* 1971, pp. 80 y ss., y Bohr en P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher - Scientist,* 1949, pp. 199-241, la derivación de las fórmulas de Heisenberg de los axiomas de la mecánica cuántica no desempeña ninguna función (ni siquiera se habla de su relación lógica con las relaciones de conmutación). Lo que se discuten son argumentos de la física clásica, especialmente de la óptica de ondas, que se usan para mostrar, por ejemplo, que la física *clásica* no nos permite medir la posición y el momento de una partícula o la energía (frecuencia) de un rayo de luz y su longitud temporal Δt con mayor precisión de lo que lo permiten las fórmulas de Heisenberg. En otras palabras, no se defienden esas fórmulas mostrándonos que nos las impone la mecánica cuántica, sino que se defienden como consecuencias de la física clásica.

La única desviación de esto es que a veces se hace uso de la «dualidad onda-partícula». Esencialmente, se usa en la forma anterior a la mecánica cuántica: se supone que la luz consiste en fotones cuya densidad (probabilidad estadística) está determinada por las amplitudes de las ondas ópticas; o se hace uso de la interpretación de Born de la ecuación de Schrödinger.

Este uso de la dualidad de onda y partícula (que Einstein aceptó, desde luego) es necesario a veces para que el argumento clásico sea convincente. Supongo que ésa es una de las razones por las que Bohr puso tanto énfasis en esa dualidad.

¿Cuál es la razón bajo ese tratamiento de las fórmulas de Heisenberg? Supongo que es un intento de mostrar la realidad de las relaciones de indeterminación (sólo la física clásica trata de la realidad física) y, de ahí, la necesidad de la mecánica cuántica: es una justificación de la mecánica cuántica igual de inevitable incluso desde el punto de vista clásico, realista. Además, es un intento de defender el carácter *necesariamente probabilista* de la teoría atómica con medios clásicos (e independientemente del álgebra de matrices no conmutativas o del álgebra de operadores)].

ciones de los lugares donde vive la gente con mayor precisión que la mínima dispersión estadística es un error.

Puesto que las fórmulas de Heisenberg son, en sus diversas interpretaciones correctas (como se mostrará detalladamente en mi próxima tesis), *leyes estadísticas de la naturaleza, derivables de una teoría estadística,* es obvio que es imposible usarlas para explicar por qué la mecánica cuántica es probabilística o estadística. Aún más, al ser leyes estadísticas, *añaden* a nuestro conocimiento: es un error pensar que ponen límites a nuestro conocimiento. A lo que ponen límites es a la dispersión de las partículas (o, más exactamente, a la dispersión del resultado de sucesiones de ciertos experimentos con partículas). Esta dispersión, nos dicen, no puede suprimirse. También es un error pensar que la supuesta limitación a nuestro conocimiento pueda ser usada válidamente para explicar el carácter estadístico de la teoría cuántica. (Véase mi octava tesis, más abajo.) Y, finalmente, vuelve a ser el mismo error decir que las fórmulas de Heisenberg nos proporcionan esa *vaguedad* que es supuestamente necesaria para afirmar sin inconsistencia el carácter «dual» de partículas y ondas; es decir, su carácter de «ondículas».

6. Mi sexta tesis es que, por muy notables que sean las leyes estadísticas de la teoría, incluidas las fórmulas (1) y (2) de Heisenberg, se refieren a una población de *partículas* (o de experimentos con *partículas)* que están, muy adecuadamente, dotadas de posiciones y momentos (y masa-energía y varias otras propiedades físicas tales como el spin). Es verdad que las relaciones de dispersión nos dicen que *no podemos preparar experimentos* en los cuales podamos evitar, al repetirlos: 1) la dispersión de la energía si *tomamos disposiciones* para un corto límite de tiempo, y 2) la dispersión del momento si *tomamos disposiciones* para una posición estrechamente limitada. Pero esto sólo significa que hay límites a la *homogeneidad estadística* de nuestros resultados experimentales. Sin embargo, no sólo es posible *medir* la energía *y* el tiempo o el momento *y* la posición, con una precisión mayor de lo que las fórmulas (1) y (2) parecen permitir, sino que *esas mediciones son necesarias para contrastar la dispersión* predicha por esas mismas fórmulas.

Trataré de presentar ahora algunos argumentos que apoyan lo que he dicho en mis dos últimas tesis. Estos argumentos mostrarán, de paso, que se pueden derivar las fórmulas (1) y (2) de Heisenberg de teorías que son mucho más antiguas que las relaciones de conmutación de la mecánica cuántica [39].

Podemos derivar la fórmula de Heisenberg

$$(1) \qquad \Delta E \, \Delta t \geqq h$$

[39] [Véase *Conocimiento objetivo (Obj. Kn.,* 1972), pp. 273-276. *Ed.*].

de la condición cuántica de Planck de 1900

$$E = h\nu$$

Esto lleva, en vista de la constancia de h, inmediatamente a

$$\Delta E = h\Delta\nu$$

Una fórmula en la que «Δ» puede ser interpretado de varias maneras. Para obtener la fórmula (1) de Heisenberg no tenemos más que combinar la última fórmula con un principio de óptica, el *principio de la potencia resolutoria armónica* que es todavía más antiguo que la condición de Planck. (Tanto Heisenberg como Bohr basan sus derivaciones de las relaciones de indeterminación, directa o indirectamente, en este principio [40].) Este principio afirma que si un tren de ondas monocromáticas de frecuencia ν es cortado por un *obturador de tiempo* en uno o varios tramos («paquetes de ondas») de duración Δt, entonces la amplitud $\Delta\nu$ de la raya del espectro será

$$\Delta\nu = 1/\Delta t.$$

Esta es, por varias razones, una ley notable. (Contiene el principio de superposición.) Lleva desde

$$\Delta E = h\Delta\nu$$

inmediatamente a

$$\Delta E \geqq = h/\Delta t$$

y, así, a la fórmula (1).

Pero al derivar la fórmula (1) de este modo, *ya no somos libres* de interpretar «Δ» de varias formas (por ejemplo, como la amplitud de la imprecisión de una medición). Estamos, más bien, restringidos en nuestra interpretación por el significado que el principio de la potencia resolutoria armónica da a «Δ». Este principio interpreta «$\Delta\nu$» como la amplitud de las rayas del espectro. Consecuentemente, el principio de Planck (en la interpretación de Einstein) nos obliga a interpretar esta amplitud como la dispersión de la energía de las partículas (fotones) que forman las rayas del espectro; porque una raya del espectro de frecuencia ν ha de interpretarse como el resultado estadístico de los fotones de energía entrantes $E = h\nu$, y por consiguiente, la amplitud $\Delta\nu$ de la raya del espectro ha de interpretarse como el recorrido ΔE de la *dispersión estadística* de las energías de los fotones

[40] *Cf.* W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory*, 1930, pp. 21 y 27.

que juntos forman la raya del espectro. Así, la fórmula (1) enuncia la ley según la cual si variamos a voluntad el período Δt de nuestro obturador, influiremos inversamente la dispersión ΔE de la energía de los fotones entrantes.

Esta derivación muestra claramente que (1) es una *ley estadística* y que forma parte de la teoría estadística. Sólo puede ser contrastada averiguando la distribución de los fotones entrantes en la película o en la placa fotográficas; y para hacerlo tenemos que medir los lugares en que los fotones golpean la raya del espectro con una imprecisión, digamos δE, muchísimo más pequeña que la amplitud ΔE de la raya:

$$\delta E \ll \Delta E$$

Así, el contraste de la ley expresada por (1) y el de sus predicciones estadísticas exige que podamos *medir* la partícula entrante con una precisión δE que satisfaga

$$\delta E \, \Delta t \ll h$$

Esta es una cosa que se hace todos los días; y muestra que las fórmulas de Heisenberg son válidas para *predicciones estadísticas sobre muchas partículas o sobre sucesiones de muchos experimentos* con partículas individuales, pero se interpreta equivocadamente que limitan la precisión de las *mediciones* de partículas individuales.

Hay una derivación de la segunda fórmula de Heisenberg

$$(2) \qquad \Delta p_x \, \Delta q_x \geqq h$$

que es análoga a la derivación con ayuda del *obturador de tiempo*. Empezamos de nuevo con un tren ν de ondas monocromáticas (planas) y lo cortamos; esta vez por medio de una *pantalla* (vertical a la dirección z del haz), con una ranura de anchura variable Δq_x (el *«experimento de una ranura»)*. Cuando la ranura sea muy ancha, sólo tendrá un efecto marginal sobre el tren de ondas. Pero cuando se estreche tendremos un efecto de dispersión (difracción): cuanto más estrecha sea la ranura Δq_x, más ancho será el ángulo con el que los rayos divergen de su dirección original: aquí es aplicable otra forma del principio de la potencia resolutoria armónica ($\tilde{\nu}_x$ es la proyección sobre el eje x del número de ondas, es decir, el número de ondas por centímetro):

$$\Delta \nu_x \approx 1/\Delta q_x$$

Multiplicando los dos lados por h, obtenemos

$$h\Delta \tilde{\nu}_x \approx h/\Delta q_x$$

Usando en lugar de la fórmula de Planck $E = h\nu$, la de de Broglie en la forma $p_x = h\tilde{\nu}_x$, podemos escribir «Δp_x» en lugar de $h\Delta\tilde{\nu}_x$; y así llegamos a (2).

Cuando la ranura es muy pequeña obtenemos, según el principio de Huygens, ondas que emergen de ella y que se extienden no sólo en la dirección z, sino también en la dirección $+x$ y $-x$ (ondas cilíndricas). Esto significa que las partículas que, antes de llegar a la ranura, tenían un momento $p_x = 0$ (puesto que avanzaban en la dirección z), tendrán ahora una dispersión considerable de los momentos Δp_x, en la dirección $+x$ y $-x$. Podemos volver a contrastar esta dispersión midiendo los diversos momentos con un espectrógrafo en diversas posiciones. En principio, apenas hay límite a la precisión δp de las mediciones de los diversos momentos en las diversas direcciones; es decir, que tenemos de nuevo

$$\delta p_x \ll \Delta p_x$$

y así

$$\delta p_x \, \Delta q_x \ll h$$

Una vez más, no podríamos contrastar la ley estadística (2) en este *experimento de una ranura* sin esas mediciones más precisas

$$\delta p_x \ll \Delta p_x$$

Por cierto, *medimos el momento,* p_x, de la partícula entrante *por medio de su posición* en la película del espectrógrafo. Y eso es típico. No debería ser necesario insistir en que casi siempre medimos los momentos por medio de las posiciones. (Por ejemplo, si medimos un efecto Doppler, lo hacemos con ayuda de una raya del espectro, el decir, midiendo la posición de la raya en una placa fotográfica.) Desgraciadamente, se ha hecho necesario hacer hincapié en este punto, a causa de la repetida afirmación de Bohr de que las mediciones del momento y las mediciones de la posición son incompatibles (y «complementarias») debido «a la exclusión mutua de dos procedimientos experimentales cualesquiera que permitan la definición inequívoca de cualidades físicas complementarias...» [41]. Los dos procedimientos experimentales, nos dice Bohr, se excluyen mutuamente porque las mediciones del momento requieren una *pantalla móvil* [42], mientras que las

[41] N. Bohr, «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», en P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* 1949, pp. 201-31; *cf.,* p. 234, donde cita de su réplica («Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?», *Physical Review,* 48, 1935, pp. 696-702) al artículo de Einstein, Podolsky y Rosen citado en la nota 14, *supra.*

[42] Tal como se describe en «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», p. 220.

mediciones de la posición requieren una *pantalla fija* o una placa fotográfica fija. Pero, con frecuencia, medimos momentos por medio de placas fotográficas fijas, es decir, por medio de las posiciones; y nunca con una pantalla móvil. (Por cierto, el uso de la pantalla móvil de Bohr entrañaría, como mínimo, dos *mediciones de la posición* de la pantalla.)

Un problema famoso de la teoría de partículas es el que plantea el conocido *experimento de las dos ranuras* (o el experimento de *n* ranuras) con dos (o más) ranuras separadas por la distancia (periódica) Δq_x. Alfred Landé ha sugerido que la situación respecto al experimento de las dos ranuras podría explicarse con ayuda de lo que podríamos llamar la fórmula de periodicidad espacial de Duane-Landé [43]:

$$\Delta p_x = nh/\Delta q_x \qquad (n = 1, 2, \ldots.)$$

Esta fórmula, que pertenece a una época anterior a la mecánica cuántica, es, a su vez, naturalmente, derivable de la mecánica cuántica.

El experimento de las dos ranuras resulta ser un experimento sobre la periodicidad espacial con la periodicidad Δq_x. Las partículas transfieren a la pantalla (o a la rejilla) un paquete de momentos Δp, o sus múltiplos, de tal forma que

$$\Delta p_x \, \Delta q_x = h$$

En consecuencia (como lo muestra Landé, *op. cit.),* obtenemos las franjas ondiformes.

La pregunta habitual de «¿cómo "sabe" la partícula que pasa a través de la ranura 1 que la ranura 2 está abierta y no cerrada?», puede contestarse ahora razonablemente. Es la pantalla (o la rejilla, o el cristal) la que «sabe» si hay o no hay una periodicidad Δq_x incorporada a ella y la que, por tanto, «sabe» si puede absorber paquetes de momentos del tamaño $\Delta p_x = h/\Delta q_x$. La partícula no necesita «saber» nada; ella simplemente interactúa con la pantalla (que «sabe»), según las leyes de la conservación del momento *y* de la periodicidad espacial; o, más exactamente, interactúa con la totalidad de las disposiciones experimentales (véanse la octava tesis y, sobre todo, la décima, más adelante). [A propósito, E. L. Hill sugirió una solución similar a su enigma en una conferencia en el Minnesota Center for Philosophy of Science, en el otoño de 1962, a la que yo tuve la suerte de asistir.]

Hasta ahora he hablado de partículas y de sus mediciones (indirectas): por ejemplo, mediciones del momento por medio de medicio-

[43] A. Landé, *New Foundations of Quantum Mechanics,* 1965, pp. 9-12.

nes de posición. Pero hay otros métodos, naturalmente: los contadores Geiger pueden medir (no con mucha precisión) la posición *y* el tiempo; y lo mismo pueden hacer las cámaras de Wilson. Y la medición de la posición en una cámara de Wilson puede ser una medición indirecta del momento. Sin embargo, la medición del tiempo de la partícula entrante puede ser del mayor interés para nosotros en todos los casos en los que la frecuencia (o la energía) de la emisión sea muy nítida —como lo es en el caso clásico de un átomo de hidrógeno de Bohr.

Aquí tenemos la constante de Rydberg, R, un número de ondas, de modo que Rc es una frecuencia constante, $^{\nu}R$, que puede calcularse, según Bohr (1913), con gran precisión a partir de las constantes de la teoría (μ es la masa del electrón; e, su carga):

$$\nu_R = Rc = 2\pi^2 e^4 \mu/h^3$$

Entonces, el principio de combinación de Rydberg-Ritz (formulado por Ritz, utilizando la constante de Rydberg en 1908, cinco años antes de la teoría de Bohr sobre el átomo de hidrógeno) afirma, para las frecuencias $\nu_{m,n}$ de emisión o absorción, la relación

$$\nu_{m,n} = \nu_R/m^2 - \nu_R/n^2 \qquad (m,n = 1, 2, \ldots)$$

Multiplicada por h se convierte en la regla de Bohr de la cuantización de la emisión y la absorción (1913) [anticipada, en parte, por Arthur Haas (que basó su cálculo en el modelo del átomo) en 1910.] Así pues, las frecuencias permisibles $\nu_{m,n}$, y las diversas energías de Bohr correspondientes, de las partículas, pueden calcularse a partir de primeros principios, por así decirlo —son variables que sólo pueden tomar ciertos valores discretos («valores característicos», que pueden describirse como quasi-constantes)—. En consecuencia, $\Delta\nu_{m,n}$ puede ser sumamente pequeño, y Δt, calculado con ayuda del principio de la potencia resolutoria armónica, será grande.

Pero esas rayas del espectro nítidas (que perderían su nitidez si interfiriese con ellas un obturador de tiempo) pueden averiguarse estadísticamente, cronometrando las llegadas de los fotones (lo que da también el tiempo de la emisión) por medios como la cámara de Wilson o el contador Geiger. (Especialmente impresionantes son las fotografías de Compton-Simon de fotones de rayos X de alta frecuencia, de frecuencia o energía muy precisas.) Para esos tiempos de llegada, podemos obtener $\delta t \ll \Delta t$ y así

$$\Delta E\, \delta t \ll h$$

7. Mi séptima tesis es que todo esto, o la mayor parte de ello, lo admitió efectivamente Heisenberg (y, por cierto, también Schrödinger).

Primero, yo repetí que las *predicciones* de la teoría son estadísticas, con una dispersión dada por las fórmulas de Heisenberg. Las *mediciones,* que tienen que ser *más precisas que la dispersión* (como he señalado) pueden servir como *contrastaciones* de esas predicciones: *esas mediciones son retrodicciones.*

Heisenberg vio, y dijo, que esas mediciones retrodictivas altamente precisas eran posibles. *Lo que no vio fue que cumplían una función en la teoría —que eran necesarias para contrastarla* (y que ellas mismas podían ser contrastadas a su vez).

Así pues, sugirió con desgana y, sin embargo, con bastante fuerza (véase el texto de la nota 47, más abajo) que esas mediciones retrodictivas *carecían de sentido.* Y esta sugerencia fue tomada y *convertida en un dogma* por los partidarios de la interpretación de Copenhague, sobre todo cuando se vio que no había vectores en el espacio de Hilbert que correspondiesen a mediciones más precisas que las fórmulas (1) y (2).

Pero este hecho no crea, en realidad, ninguna dificultad. *Los vectores en el espacio de Hilbert corresponden a aserciones estadísticas de la teoría estadística.* No dicen nada sobre mediciones ni sobre las *contrastaciones* de las aserciones estadísticas por medio de la determinación de la posición y el momento o de la energía y el tiempo de las partículas individuales.

Citaré ahora alguna evidencia en favor de mi tesis con respecto a la admisión de Heisenberg de que las mediciones que he descrito pueden resultar, y su sugerencia de que resultan, si no totalmente carentes de sentido, al menos, inútiles y carentes de interés, porque sólo se refieren al pasado. Dice que unas mediciones que «no pueden usarse nunca como condiciones iniciales en algún cálculo del progreso futuro del electrón y [que] no pueden, por tanto, ser sometidas a verificación experimental» están desprovistas de significación física [44]. Pero esto es un error doble. Porque *a)* la preparación de las condiciones iniciales es, admitámoslo, muy importante, pero también lo son los enunciados de contrastación que *siempre* miran hacia el pasado y cuya *principal* función no es ser «verificables» (es decir, contrastables) a su vez, sino «verificar» (o más exactamente, contrastar). Y *b)* aunque miren hacia el pasado, es un error pensar que esos enunciados de contrastación no son, a su vez, verificables (o, más exactamente, contrastables). Por el contrario, uno de los principios de la teoría cuántica es que toda medición puede ser «verificada» o contrastada en el sentido de que su repetición inmediata producirá el mismo resultado. (Este principio, cuyo autor parece haber sido von Neumann, no es válido como regla general, a menos que lo sea trivialmente, en el sen-

[44] *Cf.* W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory,* 1930, p. 20.

tido explicado más abajo, bajo el encabezamiento de mi novena tesis.) Así, decir que esas mediciones que miran hacia el pasado «no pueden ser sometidas a verificación experimental» es, simplemente, erróneo.

Para mostrar definitivamente que Heisenberg y yo hablamos de las mismas mediciones y que estamos de acuerdo en que no están sujetas a las relaciones de incertidumbre, quiero recordar al lector el hecho, explicado más arriba, de que las mediciones de p_x efectuadas con la ayuda de espectrógrafos en diversas posiciones (o con ayuda de una placa fotográfica paralela a la pantalla horizontal) son, de hecho, mediciones de *posición,* de modo que obtenemos toda nuestra información sobre posición y momento por medio de *dos mediciones de posición:* la primera, la proporciona la ranura Δq_x, la segunda, el impacto de la partícula en la placa fotográfica. (Podemos considerar conocida la frecuencia —o la energía— del haz.) Ahora bien, es precisamente sobre esa disposición que consiste en *dos mediciones de posición* (que nos permiten calcular la posición y el momento *después* de la primera medición y *antes* de la segunda) sobre la que Heisenberg dice lo siguiente [45]: «El... método fundamental para medir la velocidad [o momento] depende de la determinación de la posición en dos tiempos diferentes... es posible determinar con *cualquiera que sea el grado deseado de exactitud* la velocidad [o momento] anterior a la realización de la segunda [medición]; pero es la velocidad *posterior* a esta medición la única que tiene importancia para el físico...»

Heisenberg es más enfático, incluso, en relación con los experimentos en los que medimos la posición de una partícula cuyo momento es conocido (digamos que porque la partícula pertenece a un haz monocromático): «... La relación de incertidumbre no se refiere al pasado», escribe [46]; «si la velocidad del electrón es conocida al principio y luego se mide la posición con exactitud, puede calcularse la posición para tiempos anteriores a la medición. Entonces, para esos tiempos pasados, $\Delta p \Delta q$ es menor que el valor limitativo usual». Hasta ahí podemos estar de acuerdo. Pero ahora viene nuestro sutil pero importante desacuerdo; porque Heisenberg continúa: «pero este conocimiento del pasado tiene un carácter puramente especulativo, puesto que nunca... podrá ser usado como condición inicial en ningún cálculo del progreso futuro del electrón» (esto, yo creo que es verdad) «y, por tanto, no puede ser sometido a verificación experimental» (esto es falso, como mostraré).

Heisenberg añade: «Es una cuestión de creencia personal si a tal

[45] *Cf.* W. Heisenberg, *op. cit.*, p. 25; los subrayados son míos y he cambiado la posición de una frase para favorecer la comprensión y evitar una ambigüedad.

[46] *Cf.* W. Heisenberg, *op. cit.*, p. 26.

cálculo que concierne a la historia pasada del electrón puede atribuírsele alguna realidad física o no» [47].

Prácticamente todo físico que leyó a Heisenberg optó por que «no».

Pero no es una cuestión de creencia personal: las mediciones en cuestión son *necesarias* para contrastar las leyes estadísticas (1) y (2); es decir, las relaciones de dispersión.

El caso particular de una medición de la posición de una partícula a partir de la cual, de modo retrodictivo, «puedan calcularse las posiciones para tiempos anteriores a la medición, como dice Heisenberg, juega un papel de la mayor importancia en física: si medimos la posición de una partícula (un fotón o un electrón) sobre la película fotográfica de cualquier espectrógrafo, luego podemos usar esta medición de la posición (junto con la disposición, conocida, del experimento) para calcular, con ayuda de la teoría, la frecuencia o energía y, así, el momento de la partícula, siempre, naturalmente, con carácter retrodictivo. El dudar de si «puede atribuírsele realidad física o no a la historia pasada del electrón» averiguada de este modo, equivale a dudar de la significación de un método típico e indispensable de medición (retrodictiva, naturalmente); indispensable, sobre todo, para la física cuántica.

Pero una vez que atribuimos realidad a mediciones para las que, como admite Heisenberg, $\Delta p\, \Delta q \ll h$, toda la situación cambia por completo: porque ahora no puede haber duda de si, según la teoría cuántica, *un electrón puede «tener» una posición y un momento precisos. Sí que puede.*

Pero era precisamente este hecho el que se negaba constantemente: aunque Heisenberg hizo de él una «cuestión de creencia personal», Bohr y la interpretación de Copenhague (en parte debido a la inexistencia de aquellos vectores en el espacio de Hilbert) *insistieron en que un electrón no puede tener una posición y un momento nítidos al mismo tiempo.* Este dogma está en el núcleo de la tesis de Bohr de que la teoría cuántica es «completa», presumiblemente en el sentido de que una partícula no puede tener propiedades que la teoría (supuestamente) no permite «medir».

Así, la llamada «paradoja» de Einstein, Podolsky y Rosen (véase la nota 14 *supra* no es una paradoja, sino un argumento válido, porque establece precisamente esto: que tenemos que atribuir a las partículas un momento y una posición precisos, lo que Bohr y su escuela negaban (aunque Bopp lo admite).

El experimento imaginario de Einstein, Podolsky y Rosen se ha convertido ya en un experimento *real,* en relación con la creación de pares y con la destrucción de pares de partículas que crea un par de

[47] *Ibid.*

fotones. Los tiempos y las energías de los pares pueden medirse en principio con cualquier grado de precisión. Naturalmente, las mediciones son *retrodictivas:* son *contrastaciones* de la teoría [48].

¿Por qué negaron Bohr y sus partidarios que $\delta p_x \, \delta q_x \ll h$ fuera posible? A causa del gran embrollo cuántico, del supuesto dualismo de partícula y onda: se dice que hay dos «*imágenes*», *la imagen corpuscular* y *la imagen ondulatoria* y que se ha mostrado que son equivalentes o «complementarias»; es decir, válidas las dos. Pero esta «complementariedad» o «dualidad» se derrumba, según dicen, si permitimos que la partícula tenga al mismo tiempo una posición nítida y un momento nítido.

Fue de aquí, y de la interpretación subjetiva de la probabilidad, de la que nos ocuparemos a continuación, de donde surgió la interpretación subjetivista de la teoría cuántica —casi por necesidad.

8. Mi octava tesis resulta de un intento mío de explicar, aunque no de disculpar, el gran embrollo cuántico, como lo he llamado. Mi tesis es que *la interpretación del formalismo de la mecánica cuántica está estrechamente relacionada con la interpretación del cálculo de probabilidades.*

Por cálculo de probabilidades entiendo un *cálculo formal que contiene leyes formales,* tales como

$$0 \leqq p(a,b) \leqq 1$$

donde «*p (a,b)*» puede leerse como «la probabilidad de *a* condicional a *b*» (o la «probabilidad de *a* dado *b*»).

Lo que «probabilidad» (la función o funtor «*p*») *significa* y lo que *representan* los argumentos «*a*» y «*b*», queda abierto a *interpretación.*

Se supone, sin embargo, que hay un conjunto de entidades, *S,* digamos, a las que se refieren las variables *a, b, c...;* y que si *a* pertenece a *S,* entonces —*a* (léase «no-*a*»), también pertenece a *S.* Y que si *a* y *b* pertenecen a *S,* entonces *ab* (léase «*a*-y-*b*»), también pertenecen a *S.* No hace falta hacer más suposiciones sobre *S.* (En especial, no necesitamos suponer que *S* es un conjunto parcialmente ordenado.) Sin embargo, se supone que la gama de los significados admisibles de todos esos símbolos, aunque abierta a muchas interpretaciones distintas, está de algún modo limitada por el número de reglas formales que conectan esos símbolos, reglas que corresponden a la función *p* [49].

[48] Véase, por ejemplo, O. R. Frisch, «Observation and the Quantum», en M. Bunge, ed., *The Critical Approach to Science and Philosophy,* 1964, pp. 309-15. [Véase también el «Prefacio de 1982» de este tomo. *Ed.*].

[49] *Cp.* mi *L.I.C. [L. Sc. D.,* 1959], Nuevos Apéndices *iv y *v. [Véase también *Realismo y el objetivo de la ciencia (R. & A. of Sc.),* vol. I de este *Post Scriptum,* Parte 2. *Ed.*].

Las fórmulas siguientes son ejemplos triviales de tales reglas formales:

$$p(a,a) = 1$$

$p(a,b)+p(—a,b) = 1$ (a menos que b sea tal que $p(—b,b) \neq 0$[50].

$$p(a,b) = p(aa,b) = p(a,bb).$$
$$p(a,c) \geqq p(ab,c) \leqq p(b,c).$$
$$p(ab,c) = p(ba,c).$$
$$p((ab)c,d) = p(a(bc),d).$$

$p(a,b) = p(a,c)$, siempre que $p(a,a) = p(b,c) = p(c,b)$.

Podemos dar también una definición de la «*probabilidad absoluta*», $p(a)$, en términos de la «*probabilidad relativa*», $p(a,b)$:

$$p(a) = p(a, —((—a)a)).$$

(La definición en la dirección opuesta es más conocida: siempre que $p(b) \neq 0$, $p(a,b) = p(ab)/p(b)$.)

La tarea de seleccionar algunas de esas *reglas formales* de modo que todas las demás sean derivables de ellas, es la tarea de hallar una o más *axiomatizaciones* del cálculo formal de probabilidades que sean convenientes[51]. Lo menciono sólo para compararlo con la tarea de hallar una o más *interpretaciones* convenientes[52].

Hay una gran variedad de interpretaciones, que pueden dividirse en dos grupos principales: las interpretaciones *subjetivas* y las *objetivas*.

Las *interpretaciones subjetivas* son aquellas que interpretan que el número $p(a,b)$ mide algo como nuestro conocimiento, o nuestra creencia, en (la aserción) a, dada (la información) b. Así, los argumentos de la función p, es decir, a, b, c..., tienen que interpretarse en este caso como artículos de creencia o duda o artículos de información o proposiciones o aserciones o enunciados o hipótesis.

Durante mucho tiempo, se pensó (y todavía siguen pensándolo muchos matemáticos y físicos eminentes)[53] que podíamos partir de un

---

[50] Esta condición, algo inusual, se explica y discute largamente en mi axiomatización formal del cálculo de probabilidades en *L.I.C.*, nuevos apéndices *iv y *v. Todas las reglas formales que se dan aquí en relación con la octava tesis son teoremas derivables de mis axiomas.

[51] *Cf.* mi *L.I.C.*, y «*Creative and Non-Creative Definitions in the Calculus of Probability*», *Synthese*, 15, 1963, pp. 167-86; véase también correcciones en *Synthese*, 21, 1970, p. 107.

[52] *Cf.* mi «Probability Magic, or Knowledge out of Ignorance», *Dialectica*, 11, 1957, pp. 354-74.

[53] La gran significación histórica de esta creencia se discute en la sección II del «Prefacio de 1982» de este volumen.

sistema, subjetivamente interpretado, de premisas probabilistas y *luego derivar de esas premisas subjetivistas conclusiones estadísticas objetivas. Esto es, sin embargo, un disparate lógico grave.*

El origen del disparate [o, quizá, más bien, la prehistoria del disparate, y no, como me dice B. L. van der Waerden, el propio disparate] [54] puede atribuirse a algunos de los grandes fundadores de la teoría de la probabilidad, a Jacob Bernoulli y, sobre todo, a Siméon Denis Poisson, que creyeron que habían descubierto, en sus derivaciones de las varias formas de la *ley de los grandes números,* una especie de *puente* lógico-matemático que llevaba de supuestos no estadísticos a conclusiones estadísticas; es decir, a conclusiones referentes a la *frecuencia* de ciertos sucesos.

El error lógico fue analizado cuidadosamente por Richard von Mises [55] y por mí mismo [56]. Mises mostró que en alguna de las etapas de la derivación, el significado no-estadístico de los símbolos se abandona y se sustituye tácitamente por un significado estadístico. Esto suele hacerse interpretando una probabilidad próxima a 1 como «casi segura» en el sentido de que «casi siempre ocurre» en lugar de «casi segura» en el sentido de «se cree firmemente en ella» o quizá «casi conocida». A veces el error consiste en sustituir «conocida casi con seguridad» por «es sabido casi con seguridad que ocurre». Sea como fuere, el error es muy claro: de premisas sobre grados de creen-

---

[54] [*(Añadido en 1980). Quiero dar las gracias al profesor van der Waerden por una carta muy amistosa en la que expresaba su acuerdo con el presente ensayo, con la excepción de mi afirmación histórica sobre el disparate cometido por los fundadores de la teoría de la probabilidad. Debo dejar muy claro que en el terreno de la historia de la ciencia soy un aficionado (como en todos los demás terrenos, mucho me temo). Pero lo siguiente me parece bastante claro:

El cálculo de probabilidades fue interpretado por muchos de sus fundadores (si no por todos) como una teoría de la cual hay necesidad y para la cual hay una aplicación (y todas las aplicaciones de la probabilidad son estadísticas) que surgen de nuestro *insuficiente conocimiento,* en lugar de surgir de la falta de determinación en la naturaleza objetiva. El famoso enunciado de Laplace, en el que formula el determinismo acudiendo a una «vasta inteligencia» (más adelante llamada el «demonio laplaciano»), al principio de su *Essai Philosophique sur les Probabilités,* tiene precisamente la función de excluir cualquier interpretación objetiva de la probabilidad y, así, de afirmar el carácter subjetivo de la teoría de la probabilidad. La tradición así establecida dominó la física por lo menos hasta las relaciones de indeterminación de Heisenberg (1927); e incluso ellas permitían la supervivencia de una curiosa mezcla de interpretaciones subjetivas y objetivas. Los principales oponentes defendían una interpretación frecuencial (como el lógico John Venn y el matemático Richard von Mises).

Sin embargo, aunque mi comprensión de los orígenes históricos de este disparate resultara ser incorrecta, eso no afectaría a mi argumento principal: que *es* un disparate lógico tratar de derivar de unas premisas subjetivistas conclusiones estadísticas *objetivas*].

[55] R. von Mises, *Probability, Statistics and Truth,* 1939 (primera edición alemana, 1928; tercera, 1951).

[56] *Cf.* mi *Lógica de la investigación científica [L. Sc. D.],* sección 62; y «Probability Magic» (véase la nota 52 *supra).*

cia nunca podemos obtener una conclusión sobre la frecuencia de los sucesos.

Es extraño que esta idea de que podemos derivar conclusiones estadísticas de premisas que expresan incertidumbre, siga teniendo fuerza entre los teóricos cuánticos; porque John von Neumann, uno de los más influyentes entre ellos, aceptó, en su famoso libro *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics,* la teoría de la probabilidad de von Mises [57]. Sin embargo, los elogios de von Neumann a esta teoría no parecen haber inducido a los teóricos cuánticos a estudiar cuidadosamente los argumentos de von Mises en contra de la existencia de un «puente» entre las premisas no-estadísticas y las conclusiones estadísticas.

No quiero dar a entender que acepto la totalidad de la teoría de von Mises; pero creo que su crítica del supuesto «*puente*» de premisas no estadísticas a conclusiones estadísticas es incontestable; y ni siquiera sé de ningún intento serio de refutarlo. No obstante, la teoría subjetiva, bajo el nombre de «probabilidad bayesiana», es amplia e incondicionalmente aceptada.

Paso ahora a las interpretaciones objetivas del cálculo de probabilidades. Distinguiré aquí *tres* interpretaciones:

a) La *interpretación clásica* (de Moivre, Laplace) que considera que $p(a,b)$ es la proporción de casos igualmente posibles compatibles con el suceso b y que son también favorables al suceso a. Por ejemplo, sea a el suceso «a la próxima tirada de este dado, saldrá 5» y sea b la suposición «no saldrá 6» (o «sólo las tiradas en las que no salga 6 se considerarán tiradas»); entonces $p(a,b) = 1/5$.

b) La *interpretación frecuencial* o interpretación estadística (John Venn, George Helm, von Mises) que considera que $p(a,b)$ es la frecuencia relativa de los sucesos a entre los sucesos b. Esta interpretación, que yo desarrollé tratando de eliminar algunas de sus dificultades [58], es la que sostuve durante unos veinte años (desde, aproximadamente, 1930 hasta 1950), aunque siempre resalté la existencia de otras interpretaciones [59].

c) La *interpretación propensivista* que desarrollé a partir de la crítica de la forma de mi propia interpretación frecuencial y que puede considerarse al mismo tiempo como un refinamiento de la interpretación clásica.

---

[57] *Cf.* J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics,* 1949, 1955, p. 298, nota 156.

[58] Véase mi *Lógica de la investigación científica [L. Sc. D.],* cap. VIII y Apéndice *vi.

[59] Véase *op. cit.,* sección 48.

Tendré que decir algunas cosas sobre cada una de las tres interpretaciones objetivas.

En favor de *a)*, la interpretación clásica, puede decirse que se usa, casi como rutina y con mucha razón, en situaciones en las que conjeturamos que estamos ante algo parecido a «*casos igualmente posibles*»: no necesitamos experimentar con un poliedro regular para conjeturar que, si es de material homogéneo y tiene *n* lados, la probabilidad de que quede arriba uno de esos *n* lados en cualquier tirada es 1 *n*.

Por otro lado, la interpretación clásica ha sido criticada con severidad por varias razones, de las que sólo mencionaré dos: 1) Tal como es, no es aplicable a nada del tipo de casos desigualmente posibles, tales como jugar con un dado cargado. 2) Sucumbe, como la interpretación subjetiva, a la crítica de von Mises: no hay *puente* lógico o matemático (como se supuso que era la ley de los grandes números) que lleve de premisas sobre *posibilidades* a conclusiones estadísticas sobre *frecuencias relativas*. (Mises mostró esto con gran detalle para la derivación de Poisson de su ley de los grandes números.) Tampoco tiene mucho sentido decir de un cociente entre muchos casos favorables y muchos casos posibles, incluso aunque se acerque a 1, que nos dice lo que «casi seguro» va a ocurrir: es obvio que aquí ocurre (como destacó von Mises) un cambio de significado al pasar de premisas probabilistas a una conclusión estadística.

Respecto a *b)*, la interpretación frecuencial, confío en que he conseguido librarla de todos esos problemas supuestamente no resueltos que algunos destacados filósofos, como William Kneale, han visto en ella [60]. No obstante [61], consideré que hacía falta una reforma más profunda, y he tratado de responder a esa necesidad.

Y llego así a *c)*, a la *interpretación propensivista* de la probabilidad.

Nada más lejos de mi intención que tratar de resolver el pseudoproblema de dar una definición del significado de la probabilidad. Es obvio que la palabra «probabilidad» puede usarse con perfecta propiedad y legitimidad en docenas de sentidos, la mayoría de los cuales, por cierto, se desvían de los sentidos que se atienen a las normas del cálculo formal de probabilidades [62]. Ni siquiera intento decir que la interpretación propensivista de la probabilidad sea la mejor interpretación del cálculo formal de probabilidades. Sólo quiero decir que es

[60] *Cp.* W. C. Kneale, *Probability and Induction*, 1949. (Vease tambien la nota 52, *supra.)*

[61] *Cp.* mi *Realismo y el objetivo de la ciencia [R. & A. of Sc.]*, Parte 2.

[62] Para tales sentidos, y muy importantes, vease especialmente G. L. S. Shackle, *Decision, Order and Time in Human Affairs*, 1961; y C. L. Hamblin, «The Modal "Probably"», *Mind*, 68, 1959, pp. 234-40. (A proposito, yo no creo que nuestra «fe» o «creencia» subjetiva en una teoría explicativa concuerde siempre con las reglas del cálculo de probabilidades.)

la mejor interpretación que yo conozco *para la aplicación del cálculo de probabilidades a cierto tipo de «experimento repetible»,* en física, sobre todo, y también, supongo, en campos afines tales como la biología experimental.

Tampoco tiene importancia real para mi argumento si la interpretación propensivista es o no aplicable a *todos* los casos de apuestas. Se ha dicho que no es aplicable a las apuestas sobre caballos en las carreras. Si resultase que es así, simplemente recomendaría que a ese caso concreto se la aplicase una interpretación diferente. No sé nada sobre carreras de caballos; pero me parece que lo que uno puede querer saber, para apostar por un caballo, son cosas como su resistencia, velocidad (velocidad máxima y mínima, en ocasiones anteriores, por ejemplo), estado de salud y cosas similares que pueden describirse en conjunto como la propensión de ese caballo a tener una buena actuación en una carrera (en comparación, claro, con sus rivales). Si alguien —antes de hacer una apuesta— intentase obtener información del personal de un establo, ésta sería la clase de información que buscaría.

Sea como fuere, el cálculo formal de probabilidades es claramente aplicable a un extenso tipo de «juegos de azar». Pero no estoy tratando de proponer significados universalmente satisfactorios para las palabras «probable» y «probabilidad» ni siquiera una interpretación del cálculo formal aplicable universalmente. Trato de proponer una interpretación del cálculo de probabilidades que no sea *ad hoc* y que resuelva algunos de los problemas de la *interpretación de la teoría cuántica.*

Explicaré la interpretación propensivista como una evolución de la interpretación clásica. Esta última, como se recordará, explica *p(a,b),* es decir, la probabilidad de *a* dado *b,* como la proporción de esos casos igualmente posibles que satisfacen *b* y que son favorables al suceso *a.*

Propongo, como primer paso, omitir la palabra «igualmente» e introducir «pesos» [ponderaciones] y, así, hablar en lugar de «números de casos» de la «suma de los pesos de los casos». Y, como segundo paso, propongo interpretar esos «pesos» de las posibilidades (o de los casos posibles) *como medidas de la propensión o la tendencia de una posibilidad a realizarse con la repetición del experimento.*

Llego, así, a lo siguiente:

La fórmula *p(a,b)* o «la probabilidad (o propensión) de *a* dado *b*» puede interpretarse como la «suma de los pesos de los casos posibles que satisfacen la condición *b* y que son también favorables a *a,* dividida por la suma de los pesos de los casos posibles que satisfacen *b*».

La idea principal de esta interpretación puede expresarse también como sigue: propongo distinguir por el momento los *enunciados de*

probabilidad de los *enunciados estadísticos* (o enunciados de frecuencia relativa), y considerar los enunciados de probabilidad como enunciados sobre frecuencias en sucesiones *virtuales* (finitas) de experimentos bien caracterizados, y los enunciados estadísticos como enunciados sobre frecuencias en sucesiones *reales* (finitas) de tales experimentos. En los enunciados de probabilidad, los «pesos» atribuidos a las posibilidades son medidas de esas frecuencias virtuales (conjeturales) *a contrastar por medio de frecuencias estadísticas reales.*

Usaré un ejemplo: si tenemos un gran dado que contenga un trozo de plomo cuya posición sea ajustable, podemos *conjeturar* (por razones de simetría) que los pesos (es decir, las propensiones) de las seis posibilidades son *iguales* siempre que el centro de gravedad se mantenga equidistante de los seis lados, y que se hacen *desiguales* si cambiamos el centro de gravedad de esa posición. Por ejemplo, podemos aumentar el *peso de la posibilidad* de que salga 6 alejando el centro de gravedad del lado que tiene el número «6». Y podemos interpretar que la palabra «peso» significa «una medida de la propensión o tendencia a quedar arriba al repetirse el experimento». Más exactamente, podemos acordar tomar como nuestra medida de esa propensión la *frecuencia relativa* (virtual) con la que el lado queda arriba en una sucesión (virtual y virtualmente infinita) de repeticiones del experimento.

Podemos luego contrastar nuestra conjetura por medio de una secuencia de repeticiones reales del experimento.

Al proponer la interpretación propensivista, propongo considerar los *enunciados de probabilidad* como enunciados sobre alguna medida de una propiedad (una propiedad física, comparable a la simetría o la asimetría) de *toda la disposición experimental repetible*[63]; una

[63] [*(Añadido en 1980). Respecto a la palabra «experimentos»: Siempre pretendí que mi teoría de las propensiones fuese una teoría física completamente objetiva. Las propensiones se refieren a cualquier situación física. Las propensiones no son, pues, propiedades de la partícula sino de la situación física objetiva; por ejemplo, de una situación experimental. Naturalmente, la situación objetiva será normalmente una que haya surgido en el mundo físico sin interferencia humana, aunque *puede* ser debida al hombre y quizá incluso a un físico que ha construido un aparato. En este último caso, hablamos de «disposición experimental». Mi uso algo accidental de esta frase en el texto, aquí, ha llevado a algunos de mis críticos a pensar que hablo de propensiones *sólo* en relación con esas disposiciones experimentales *creadas por el hombre*. Y de ello han concluido que no tengo éxito en mi intento de exorcizar al «observador»; también, que mi teoría es esencialmente equivalente a la de Bohr. Así, Feyerabend y Bunge — Max Jammer, siguiendo a Feyerabend — me han atribuido un énfasis (o «insistencia») en la situación experimental que hace parecer que soy un subjetivista. Jammer escribe (*The Philosophy of Quantum Mechanics*, 1974, p. 450) que «la interpretación de Popper y sus polémicas con Bohr fueron severamente criticadas por Paul K. Feyerabend en una extensa reivindicación de la complementariedad... Porque la insistencia de Popper en que las condiciones experimentales de toda la situación física determinan la distribución de la probabilidad es, en opinión de Feyerabend, precisamen-

medida, más exactamente, de una *frecuencia virtual;* y propongo considerar los *enunciados estadísticos* correspondientes como enunciados sobre la *frecuencia real* correspondiente.

De esta forma superamos fácilmente la objeción planteada por von Mises contra la interpretación clásica, sustituyendo simplemente las meras *posibilidades* por *propensiones* que interpretamos como tendencias a producir frecuencias relativas con la repetición de condiciones o circunstancias similares.

Hay dos puntos más, que son muy importantes:

Primero, la distribución de la probabilidad se considera una propiedad del *experimento singular* y una ley probabilista (o un enunciado de probabilidad) se considera relativa a alguna regla que especifique las condiciones para aceptar una situación o un experimento como *repetición de otro*[64]. Por ejemplo, al echar los dados, el tiempo mínimo que se tarda en sacudir el cubilete puede o no formar parte de esa regla o de esas condiciones o especificaciones.

En segundo lugar, podemos considerar la probabilidad como una *propiedad física real de cualquier situación física única concreta y, por tanto, también del experimento físico singular* o, más exactamente, de las *condiciones experimentales* establecidas por la regla que define las condiciones para la *repetición* (virtual) del experimento.

Una propensión es, pues, un tipo algo abstracto de propiedad física; no obstante, es una propiedad física real. Usando la terminología de Landé, *puede recibir patadas y puede devolverlas.*

Tomemos, por ejemplo, un billar romano corriente simétrico, construido de tal modo que si dejamos que rueden por él un cierto número de bolas pequeñas, formarán (idealmente) una curva normal de dis-

te lo que Bohr tenía en mente cuando usaba la noción de un «fenómeno» para incluir la descripción de toda la disposición experimental» *(cf.* Feyerabend, «On a Recent Critique of Complementarity», *Philosophy of Science,* 35, pp. 309-331 (1968); y 36, pp. 82-105 (1969)). Esto es tomar como base para criticarle a uno una formulación casi accidental, ignorando el contexto y todo lo que he escrito sobre propensiones. De toda mi obra anterior y también de este libro (véase en especial el Epílogo metafísico de este tomo y el capítulo III, sección 18, más adelante), se deduce claramente que las propensiones, como yo las llamo, son completamente objetivas y *no* dependen de *nuestra* disposición de los experimentos, sino simplemente de la situación física que, en ciertos casos, puede ser experimentalmente controlada. En la medida en que una disposición experimental creada por el hombre es un hecho físico objetivo, una situación física objetiva, lleva a las propensiones, *de la misma manera que cualquier otra situación física.* (Véanse también las tesis 10 y 11, más adelante.) A propósito, es perfectamente cierto que no es en esto en lo que estoy en desacuerdo con Bohr. Pero eso no significa que esté de acuerdo con él.]

[64] En esta oración he añadido las palabras «y una ley probabilista (o un enunciado de probabilidad) se considera», para resaltar el argumento de que los enunciados de probabilidades (en física) son equivalentes a leyes (puesto que conciernen a repeticiones virtuales). He hecho un cambio similar en el tercer párrafo en mi décima tesis, más adelante, donde he añadido la frase «Los enunciados de propensiones en física describen» en sustitución de «[las propensiones] son».

tribución. Esta curva representará, para cada experimento singular, *la distribución de probabilidades* de que una única bola llegue a un determinado lugar, factible, de reposo.

Demos ahora «una patada» a dicho billar; por ejemplo, levantándole ligeramente el lado izquierdo. Entonces damos también una patada a las propensiones —a la distribución de la probabilidad—, puesto que será ligeramente más probable que cualquier bola individual se detenga en un punto hacia el extremo derecho de la parte baja del tablero del billar. Y la propensión devolverá la patada: producirá una curva de forma diferente con las bolas si las dejamos rodar y acumularse.

O, si no, quitemos una *clavija*. Esto alterará la probabilidad en cada uno de los experimentos, con cada una de las bolas, *tanto si la bola se acerca al lugar de donde hemos sacado la clavija como si no*. (Esto se asemeja al experimento de las dos ranuras, aunque aquí no tenemos superposición de amplitudes[65]; porque podemos preguntar: ¿Cómo «sabe» la bola que hemos quitado una clavija si no se acerca al lugar en que estaba? La respuesta es: la bola no «sabe»; pero el billar en conjunto lo «sabe» y cambia la distribución de la probabilidad, o la *propensión* para *cada una* de las bolas; un hecho que puede contrastarse por medio de contrastaciones estadísticas.)

---

[65] [Esta observación demuestra claramente que Feyerabend no leyó este artículo cuidadosamente antes de formular *(op. cit.)* a Popper la objeción de que las probabilidades en el billar romano son aditivas, mientras que en la teoría cuántica, donde se da la superposición de amplitudes, la situación no es aditiva. Más adelante, en la novena tesis, Popper escribe también a propósito del billar: «No habrá interfencia de amplitudes: si tenemos dos ranuras Δq_1 y Δq_2, las dos probabilidades mismas (más que sus amplitudes) tienen que ser adicionadas y normalizadas: no podemos imitar el experimento de las dos ranuras. Pero éste no es nuestro problema en esta etapa». Feyerabend objeta también que Popper no intenta nunca explicar las formas de producirse las interferencias, pero que, en cambio, hace hincapié «una y otra vez sobre el carácter relacional de las probabilidades». Pero Popper no estaba preocupado por explicar las formas en que se producen las interferencias: *¡Eso* es tarea de la teoría cuántica! A Popper le importaba, más bien, criticar la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica. Por supuesto, Popper no explica la interferencia en el ejemplo del billar romano. Lo que hace con él es señalar que la probabilidad es una cualidad de un sistema y que no es atribuible a uno de los elementos del mismo. De ahí que todo el sistema de las probabilidades pueda alterarse con un cambio en las condiciones. En efecto, Popper sostenía que eso es todo lo que implica la reducción del paquete de ondas (actualmente llamado con frecuencia el «derrumbamiento del vector de estado»). Para establecer su proposición, *tenía* que presentar un ejemplo de una reducción del paquete de ondas en una situación clásica. Como ya se ha dicho, la mecánica cuántica explica la interferencia. Para dilucidar la clase específica de interferencia que se presenta en el experimento de las dos ranuras, Popper da un paso más, cuya mención omite Feyerabend: recurre a la aplicación que hizo Landé de la tercera regla cuántica de Duane para explicar (o quizá mejor, para mostrar la posibilidad de explicar) las formas de interferencia de las ondas. Véase mi «Critical Study: The Philosophy of Karl Popper: parte II. Consciousness and Physics», en *Philosophia*, 7, 3-4, julio de 1978, pp. 675-716, esp. p. 695. Véase también Tesis 13 más adelante. *Ed.*].

Así pues, podemos «dar patadas» al campo de probabilidades, efectuando ciertos cambios (graduales o repentinos) en las condiciones del experimento y el campo «devuelve las patadas» cambiando las propensiones, un efecto que podemos contrastar estadísticamente repitiendo el experimento bajo las condiciones cambiadas.

Pero hay otros aspectos importantes de la interpretación propensivista que podemos ilustrar, una vez más, con ayuda del billar romano.

Dejemos el tablero del billar en su estado normal (simétrico); entonces podemos preguntar cuál será la distribución de la probabilidad de que alcancen las diversas posiciones finales, *aquellas bolas que satisfagan la condición de golpear una clavija determinada* (o, alternativamente, para aquéllas que satisfagan la condición de golpear una clavija determinada y luego pasar por su izquierda).

Esta nueva distribución será, naturalmente, bastante distinta de la distribución original. Puede calcularse a partir de primeros principios (dado un tablero simétrico); y podemos *contrastar* nuestros cálculos de varias formas. Por ejemplo, podemos dejar que las bolas rueden hacia abajo, como es habitual, pero hacer una lista aparte de las posiciones finales de aquellas bolas que hayan golpeado la clavija seleccionada (o que la hayan golpeado y hayan pasado después por su izquierda); o, si no, podemos *quitar* al momento todas las bolas que no satisfagan la nueva condición. En el primer caso, no hacemos más que *tomar nota* de la nueva «medición de la posición» de la bola; en el segundo, *seleccionamos* las bolas que pasan por una posición predeterminada.

En los dos casos obtendremos contrastes de la nueva distribución calculada: la distribución de todas aquellas bolas que han sido sometidas a una «medición de la posición» (un caso análogo a una «preparación de estado»).

La teoría del billar romano nos permite, naturalmente, calcular, a partir de primeros principios, las nuevas distribuciones para cualquier clavija que escojamos; de hecho, todas esas nuevas distribuciones están implícitas en el cálculo de la distribución normal original. Porque este cálculo supone que la bola golpeará con tal y tal probabilidad, tal y tal clavija.

9. Novena tesis. En el caso del billar romano, la transición de la distribución original a una que suponga una «medición de la posición» (tal como se describe aquí) —tanto si es real como supuesta o fingida— no es meramente análoga, *sino idéntica a la famosa «reducción del paquete de ondas»* (o «derrumbamiento del vector de estado») en la mecánica cuántica [66]. En consecuencia, la «reducción del

[66] Algunos argumentos importantes que refuerzan la novena tesis específicamente a la luz de la interpretación propensivista se encontrarán más adelante en la sección 4.

paquete de ondas» no es un efecto característico de la teoría cuántica: es un efecto de la teoría de la probabilidad en general[67].

Tomemos de nuevo nuestro ejemplo del billar romano: dada, no sólo la topografía del tablero, sino también su inclinación y algunos datos más, podemos considerar la distribución de la probabilidad como una especie de frente de ondas descendentes que inicia el descenso cuando la partícula entra en el tablero a través de su ranura Δq. No habrá interferencia de amplitudes: si tenemos dos ranuras Δq_1 y Δq_2, las dos probabilidades mismas (más que sus amplitudes) tienen que ser adicionadas y normalizadas: no podemos imitar el experimento de las dos ranuras. Pero éste no es nuestro problema en esta etapa. Lo que quiero mostrar es esto: podemos calcular una onda de probabilidades que descienda a la parte inferior del tablero de billar y forme allí una curva de distribución muy parecida a un paquete de ondas.

Ahora bien, si dejamos que ruede *una* bola real, podemos considerar el experimento desde varios puntos de vista:

a) Podemos decir que el experimento en conjunto determina una cierta distribución de la probabilidad y la retiene (al repetirse el experimento) prescindiendo de cuáles sean las clavijas particulares golpeadas por la bola.

b) Podemos decir que cada vez que la bola golpea de hecho una cierta clavija (o, digamos, pasa a su izquierda), la distribución de la *probabilidad objetiva* (la distribución de la propensión) resulta cambiada «repentinamente», tanto si alguien toma nota del curso de la bola como si no. Pero esto no es más que una forma vaga de decir lo siguiente: *si sustituimos la especificación de nuestro experimento por otra* que especifique que la bola golpee a esa clavija determinada (o que pase por su izquierda), entonces tendremos un experimento diferente y en consecuencia obtendremos una distribución distinta de las probabilidades.

c) Podemos decir que el *conocimiento* o la *información* o la *conciencia* o la *percepción* de que ha tenido lugar una medición de la posición lleva al «derrumbamiento» o «reducción» del paquete de ondas original y a su sustitución por uno nuevo. Pero al hablar así, sólo decimos lo mismo que habíamos dicho antes, en *b);* excepto que ahora usamos un lenguaje subjetivista (o una filosofía subjetivista).

Es obvio que si no *sabemos* qué clavija ha golpeado la bola, no *sabemos* con qué nuevo conjunto de condiciones experimentales (propensiones) podríamos sustituir, en este caso particular, el conjunto anterior de condiciones experimentales. Pero tanto si lo sabemos como si no, *sí* que sabíamos desde el principio que había tal y tal probabilidad de que la bola golpease tal y tal clavija y, por tanto, de que

[67] *Cf.* mi *Lógica de la investigación científica [L. Sc. D.]*, sección 76.

cambiase su propensión a golpear otras clavijas y de llegar, por último, a un cierto punto (o columna) *a,* en la parte inferior del tablero. Fue sobre este conocimiento sobre el que basamos nuestro cálculo de la distribución original de probabilidades (paquete de ondas).

Llamemos «e_1» a nuestra especificación original del experimento del billar romano y llamemos a la nueva especificación (según la cual consideramos o seleccionamos como repetición del nuevo experimento sólo aquellas bolas que hayan golpeado una cierta clavija *x,* por ejemplo) «e_2». Es obvio entonces, que las dos probabilidades de aterrizar en *a, p(a,e₁)* y *p(a,e₂),* no serán iguales en general, porque los dos experimentos descritos por e_1 y e_2 no son iguales. Pero eso no significa que la nueva información que nos dice que las condiciones e_2 están satisfechas, cambie *p(a,e₁):* desde el principio mismo podíamos calcular *p(a,e₁)* para los diversos puntos «*a*» y también *p(a,e₂);* y sabíamos que

$$p(a,e_1) \neq p(a,e_2).$$

Nada ha cambiado si nos informan de que la bola ha golpeado, de hecho, la clavija *x,* excepto que ahora somos libres, *si lo deseamos,* de aplicar *p(a,e₂) a este caso:* o, dicho de otro modo, somos libres de considerar el caso como un ejemplo del experimento e_2 en lugar de serlo del experimento e_1. Pero podemos, naturalmente, continuar considerándolo un ejemplo del experimento e_1 y, por tanto, continuar operando con *p(a,e₁):* las probabilidades (y también los paquetes de probabilidades, es decir, la distribución para los diversos puntos *a)* son *probabilidades relativas: son relativas respecto a lo que vamos a considerar una repetición de nuestro experimento;* o, dicho de otro modo, son relativas respecto a qué experimentos son, o dejan de ser, *considerados pertinentes para nuestra contrastación estadística.*

Tomemos otro ejemplo, uno muy famoso, debido a Einstein y discutido por Heisenberg [68] y por mí mismo [69]. Tomemos un espejo semitransparente y supongamos que la probabilidad de que la luz sea reflejada por él es de 1/2. Así, la probabilidad de que la luz pase a través de él será también de 1/2 y tenemos, si el suceso de «pasar a través» o «transmitirse» es *a* y la disposición experimental es *b,* que

$$p(a,b) = 1/2 = p(\text{—}a,b),$$

en donde «—a» (es decir, «no-a») representa el suceso «reflexión». Ahora, realicemos el experimento con un solo fotón. Entonces, el pa-

[68] *Cf.* W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Theory,* 1930, p. 39.
[69] *Cf.* mi *Lógica de la investigación científica,* final de la sección 76 (pp. 213-220, en la edición española).

quete de ondas de las probabilidades correspondientes a este fotón se dividirá y tendremos los *dos* paquetes de ondas, *p(a,b)* y *p(—a,b)* para los cuales se cumplirá nuestra ecuación

$$p(a,b) = 1/2 = p(—a,b).$$

«Después de un tiempo suficiente», escribe Heisenberg, «las dos partes estarán separadas por cualquier distancia que se desee...» Ahora supongamos que «encontramos», con la ayuda de una placa fotográfica, que el fotón (que es indivisible) se había reflejado. (Heisenberg dice que está «en la parte reflejada del paquete», lo que es una metáfora equívoca.) «Entonces, la probabilidad», escribe [70], «de encontrar al fotón en la otra parte del paquete *inmediatamente se hace cero*. El experimento en la posición del paquete reflejado ejerce, pues, un tipo de acción (reducción del paquete de ondas) sobre el punto distante ocupado por el paquete transmitido, y puede verse que esta acción se propaga con una velocidad mayor que la de la luz».

Esto es el gran embrollo cuántico en grado superlativo. Teníamos, y seguimos teniendo, las probabilidades relativas

$$p(a,b) = 1/2 = p(—a,b).$$

Si tomamos la información *—a* (que dice que la partícula ha sido reflejada), entonces, en relación con esta información, tenemos

$$p(a,—a) = 0,\ p(—a,—a) = 1.$$

La primera de esas probabilidades, o paquetes de ondas, es, por supuesto, cero. Pero es un error sugerir que constituye una especie de cambio del paquete original *p(a,b)* que «*inmediatamente se hace cero*». El paquete original *p(a,b)* sigue siendo igual a 1/2, lo que debe interpretarse como que si repetimos nuestro experimento original, la frecuencia virtual de los fotones transmitidos será igual a 1/2.

Y *p(a,—a),* que es cero, es una probabilidad totalmente distinta: se refiere a *un experimento totalmente diferente* que, aunque empieza como el primero, *termina según su especificación* sólo cuando descubrimos (con ayuda de una placa fotográfica) que el fotón ha sido reflejado.

Ninguna *acción* se ejerce sobre el paquete de ondas *p(a,b),* ni una acción a distancia ni ninguna otra. Porque *p(a,b)* es la propensión del estado del fotón en relación con las condiciones experimentales originales. Esto no ha cambiado y puede contrastarse repitiendo el experimento original.

Podría pensarse que es innecesario repetir todo esto. Pero recien-

[70] *Cf.* W. Heisenberg, *op. cit.,* p. 39; los subrayados son míos.

temente, Heisenberg ha sugerido que la reducción del paquete de ondas es algo similar a un salto cuántico [71]. Porque, por un lado, habla de la «reducción de los paquetes de ondas» como del «hecho de que la función de las ondas... cambia de modo discontinuo». Y añade: «Es bien sabido que la reducción de los paquetes de ondas siempre aparece en la teoría de Copenhague cuando *se completa la transición de lo posible a lo real...*», es decir, cuando «se selecciona lo real entre lo posible, selección que realiza el *"observador"...*» Por otro lado, Heisenberg habla, en la página siguiente, del «elemento de discontinuidad [en] el mundo, que se encuentra por todas partes en la física atómica... [y que en] la interpretación habitual de la teoría cuántica... *está contenido en la transición de lo posible a lo real*» [72].

Sin embargo, está claro que la reducción del paquete de ondas no tiene nada que ver con la teoría cuántica: es un rasgo trivial de la teoría de la probabilidad que, sea cual fuere *a*, $p(a,a) = 1$ y (en general) $p(-a,a) = 0$.

Supongamos que lanzamos un penique al aire [73]. La probabilidad de cada uno de sus estados posibles es igual a 1/2. Mientras no miremos el resultado de nuestra tirada, *podemos* seguir diciendo que la probabilidad será 1/2. Si nos agachamos a mirar, la probabilidad cambia «de repente»: una probabilidad se hace 1 y la otra 0. ¿Ha habido un salto cuántico debido a que hayamos mirado? ¿Ha influido nuestra observación en el penique? Es obvio que no. (El penique es una partícula «clásica».) Ni siquiera la probabilidad (ni la propensión) han sido influidas. Aquí, como en *cualquier* reducción del paquete de ondas, no está implicado nada más que un principio trivial: si nuestra información contiene el resultado de un experimento, entonces la probabilidad de ese resultado, *por lo que respecta a esta información* (con-

---

[71] [(*Añadido en 1980.) Esta comparación del derrumbamiento del vector de estado con el salto cuántico no es muy buena; aunque, como veremos en la sección 4, puede haber, efectivamente, una discontinuidad real, no siempre está presente. Por ejemplo, puede haber la discontinuidad de que un fotón sea reflejado, o no lo sea, por un espejo semi-permeable. Lo que suele llamarse salto cuántico se caracteriza, en realidad, por dos hechos. Uno es que el salto es más o menos probable, y tiene una función de probabilidades, pero no necesita ocurrir por fuerza. El otro hecho es que no vemos el mecanismo del salto cuántico. El propio salto cuántico es, desde el punto de vista de la teoría cuántica, inexplicable. Hay simplemente la probabilidad o la propensión a dar el salto. Mientras que en el caso del espejo semi-permeable, tenemos algo parecido a un mecanismo de reflexión o de penetración. Es correcto decir que no tienen por qué funcionar ninguno de los dos mecanismos, en este caso, pero puede ocurrir que funcione uno de los dos. Y eso lleva a una discontinuidad].

[72] *Cf.* Heisenberg, «The Development of the Interpretation of the Quantum Theory», en W. Pauli, ed., *Niels Bohr and the Development of Physics,* 1955, pp. 12-29; véanse pp. 23 y ss. (Los subrayados son míos.)

[73] Este ejemplo está tomado de mi artículo «The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability, and the Quantum Theory», en Stephan Körner, ed., *Observation and Interpretation in the Philosophy of Physics,* 1957, pp. 65-70 y 88 y ss.

siderada parte de la especificación del experimento) será siempre, de modo trivial, $p(a,a) = 1$ [74].

Esto también explica lo que es válido en el principio de von Neumann, mencionado más arriba, en mi séptima tesis, que si repetimos una medición al momento, entonces el resultado será el mismo con toda certeza. En efecto, es bastante trivial que si miramos al penique por segunda vez, seguirá estando como antes. Y más generalmente: si consideramos una «medición» como la del fotón que ya ha llegado, como *definitoria de las condiciones del experimento,* entonces, el resultado de la repetición es seguro, en virtud de la especificación del experimento junto con el hecho trivial de que $p(a,a) = 1$.

Antes de pasar a mi próxima tesis, voy a volver un momento al billar romano. Sea

$$p(x,e_1) = r$$

la probabilidad de que una bola choque con la clavija x, en el experimento original, y supongamos que vemos que la bola pasa junto a x *sin* golpearla. Esto, entonces, puede interpretarse exactamente de la misma forma en que Heisenberg interpreta el experimento con el espejo semitransparente [75]: podríamos decir (sería muy engañoso) que el paquete de ondas $p(x,e_1)$ se derrumba, que se hace cero con velocidad superior a la de la luz. Espero que el argumento no necesite mayor elaboración.

10. Mi décima tesis es que la interpretación propensivista resuelve el problema de la relación entre las partículas y sus estadísticas y, por tanto, el de la relación entre partículas y ondas.

Dirac escribe [76]: «Algún tiempo antes del descubrimiento de la mecánica cuántica, la gente [Einstein, von Laue] se dio cuenta de que la relación entre las ondas luminosas y los fotones debía tener un carácter estadístico. De lo que no se dieron cuenta realmente, sin embargo, fue de que la función de ondas proporciona información sobre la probabilidad de que *un* fotón esté en un lugar determinado y no del número probable de fotones en ese lugar.» Y continúa con un ejemplo muy parecido al ejemplo discutido más arriba sobre el espejo semitransparente en interacción con *un* fotón [77].

---

[74] [*(Añadido en 1980). Véase la sección 4, *infra,* donde se revisa este argumento y, espero, se perfecciona].

[75] Véase la nota 70, *supra.*

[76] *Cf.* P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics,* cuarta edición, 1958, p. 9.

[77] Dirac tenía razón, sin duda, en la importante cuestión de que cada partícula singular va acompañada de una onda —u ondas— de propensiones. (La onda toma inmediatamente en consideración todas las posibilidades de la situación a su alrededor.) Sin embargo estaba equivocado al pensar que sólo los trenes de ondas que pertenecen a

Ahora bien, esta aplicación de la teoría a casos singulares es precisamente lo que consigue la interpretación propensivista. Pero no lo hace hablando de partículas o de fotones. *Las propensiones no son propiedades ni de las partículas ni de los fotones ni de los electrones ni de los peniques.* Los enunciados de propensiones en física describen propiedades de la situación y son contrastables si la situación es típica, es decir, si se repite (como en el caso de la emisión de la luz). Son, por tanto, *propiedades* también *de las disposiciones experimentales repetibles*: físicas y concretas en la medida en que pueden ser contrastadas empíricamente (y llevar, en el caso del billar romano, a una disposición real física característica de las bolas) —y abstractas en la medida en que *cualquier disposición experimental particular* puede ser considerada como un ejemplo de más de una especificación para «su» repetición. (Tómese el caso de la tirada del penique: puede haber sido lanzado a nueve pies de altura. ¿Diremos que el experimento se ha repetido si se lanza por segunda vez a una altura de diez pies, o no? Es esta *relatividad* de las propensiones la que las hace a veces parecer «irreales»: es el hecho de que se refieran a casos singulares y a sus repeticiones virtuales y de que cualquier caso singular tenga tantas propiedades que no podamos decir sólo mediante un examen cuáles de ellas tienen que incluirse entre las especificaciones que definen lo que debe considerarse «nuestro experimento» y «su repetición».

Pero esto no sólo es verdad de todas las propensiones o probabilidades (clásicas o mecánico-cuánticas); es verdad también de *todos los experimentos físicos o biológicos* y es una de las razones por las que la experimentación es imposible sin una teoría: lo que parece un aspecto completamente irrelevante de un experimento e_1, o arbitrariamente variable en sus repeticiones, puede resultar que en «otro» experimento e_2 (imposible de distinguir de otro modo) es parte de sus especificaciones más importantes. Todo experimentador puede poner innumerables ejemplos. Algunos de los llamados descubrimientos fortuitos se han hecho al obtener resultados no deseados o no esperados en la repetición de un experimento y al notar entonces que el cambio en el resultado dependía de algún factor del que previamente se había conjeturado que era irrelevante y que, por tanto, no se había incluido en la especificación del experimento (ni tampoco se había excluido de ella).

Así pues, la *relatividad respecto a la especificación* de la que hemos hablado no es característica de los experimentos cuánticos ni siquiera de los experimentos estadísticos: *es un rasgo permanente de*

una y la misma partícula pueden interferir entre sí. Este dogma (cuya influencia sobre la irracionalidad de la interpretación de Copenhague difícilmente puede exagerarse) ha sido refutado por la invención del láser.

toda experimentación. (Y una relación de propensión podría considerarse, y comprenderse intuitivamente, como una generalización de una relación «causal», de cualquier forma que interpretemos la «causalidad».) Por esta razón me parece un error considerar las leyes estadísticas, las distribuciones estadísticas y otras entidades estadísticas como no-físicas o irreales. Los campos de probabilidades son físicos, aunque dependan o estén relacionados con condiciones experimentales especificadas [78].

11. Mi undécima tesis es ésta: aunque tanto las partículas como los campos de probabilidades son reales, el hablar de una «dualidad» entre ellos induce a error (como ha insistido Landé con toda razón): las partículas son *objetos* importantes de la experimentación, los campos de probabilidades son campos de propensiones y, como tales, son, en primer lugar, importantes *propiedades de la disposición experimental* de las condiciones especificadas. Naturalmente, pueden convertirse, a su vez, en objetos de estudio, de la misma manera que otras propiedades físicas tales como el momento de una partícula. Como hemos visto, pueden ser incluso objetos a los que uno puede dar una patada, que ellos pueden devolver. Sin embargo, no hay dualidad en ningún sentido en el que podamos hablar o bien de partícula o bien de onda, pero no de las dos a la vez —de la misma manera que no hay una dualidad entre una partícula y su momento que nos impida hablar de los dos al mismo tiempo.

Un sencillo ejemplo puede ilustrar que no tenemos que tomar la propensión como una simple propiedad de la partícula sola, sino de la partícula y de la situación total —una situación que puede ocurrir, naturalmente, sin que haya ninguna actividad humana, aunque también puede ser una situación preparada por los hombres para un estudio especial, sobre todo cuando están estudiando esas cuestiones [79]. Uno se siente fácilmente tentado a considerar la probabilidad 1/2 como una propiedad de una cosa, de una especie de «partícula». *Pero hay que resistir a esta tentación.* Porque, supongamos una disposición experimental en la que no se haga girar al penique, sino que se le lance de tal manera que caiga sobre una mesa con ranuras en las que puede caer de canto. Entonces podemos distinguir entre *tres* posibilidades: que salgan caras, que salgan cruces o que no salga ninguna de las dos cosas. O, incluso, cuatro posibilidades: si las ranuras están todas en dirección norte-sur, podemos distinguir los peniques que han caído en las ranuras según la dirección hacia donde miren

[78] *Cf.* mi *Desarrollo del conocimiento científico* [C. & R., 1963, 1972, pp. 213 y ss.]. Véase también la advertencia en la nota 63, *supra.*

[79] Este ejemplo está tomado de mi artículo «The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability and the Quantum Theory», *op. cit.*, p. 89.

sus caras (este u oeste). Esto muestra qué condiciones diferentes a la estructura del penique (o de la partícula) pueden contribuir en gran manera a la probabilidad o propensión: la totalidad de la disposición experimental determina el «espacio muestral» y la distribución de la probabilidad. (También podemos concebir fácilmente especificaciones según las cuales las condiciones experimentales cambien, quizá incluso, de una cierta forma «aleatoria» mientras el experimento sigue su curso.)

Así pues, la propensión o probabilidad no es (como la calvicie o la carga) una propiedad del miembro de la población (hombre, partícula), sino algo más parecido a la popularidad (y, por consiguiente, a las estadísticas de ventas) de una determinada marca de chocolate, que depende de todo tipo de condiciones (publicidad, organización de las ventas, distribución estadística, en la población, del gusto preferente por ciertos tipos de chocolate). Y una distribución ondiforme de una probabilidad (o una amplitud de la probabilidad) es, en efecto, algo de lo que no se puede decir que es una «imagen» alternativa del miembro de la población (hombre, tableta de chocolate, partícula). Sería bastante poco apto hablar de una «dualidad» (una relación *simétrica)* entre una tableta de chocolate y la forma de la curva de distribución de su propensión a ser vendida mañana.

[El ejemplo más antiguo y mejor conocido de una propensión en física atómica es, naturalmente, la radioactividad, interpretada como la propensión de cada núcleo radiactivo a desintegrarse. A esta propensión es extremadamente difícil «darle una patada» y durante mucho tiempo se pensó que era, en principio, impateable; es decir, independiente de todas las condiciones experimentales. Sólo cambió esta concepción con la teoría de la resonancia nuclear y por ella vemos que una propensión nuclear a la desintegración puede, tanto en los átomos individuales como en conjunto, resultar influenciada por las condiciones experimentales. (La inserción de este párrafo se debe a una advertencia de Sir Hermann Bondi, a quien estoy enormemente agradecido.)]

12. Mi duodécima tesis es que la idea equivocada de una dualidad de partícula y onda es, en parte, debida a las esperanzas que crearon de Broglie y Schrödinger de formular una teoría ondulatoria de la *estructura de las partículas.*

Transcurrió un lapso de dos años entre el principio de la mecánica de ondas y el éxito del análisis y la interpretación de los experimentos que contrastaban la interpretación estadística de Born de la función Ψ, que se presentó por primera vez en 1926 [80]. En aquellos años, los

[80] *Cf.* M. Born, «Bemerkungen zur statistischen Deutung der Quantenmechanik»,

problemas estadísticos parecían menos importantes que la esperanza de resolver los problemas de la estabilidad atómica (y de los saltos cuánticos) por un método clásico. Era un método precioso y una esperanza alentadora: la esperanza no era nada menos que la de explicar la materia y su estructura por medio de conceptos de campos. Cuando Schrödinger y Eckart mostraron, más tarde, la equivalencia (de largo alcance pero no completa) de la teoría ondulatoria y de la teoría corpuscular de Heisenberg, nació la interpretación de la doble imagen, con su idea de una simetría o dualidad entre onda y partícula. Pero en la medida en que había una equivalencia, era una entre *dos teorías estadísticas* —una teoría estadística («mecánica matricial») que partía de la conducta estadística de las partículas y una teoría estadística que partía de la figura ondiforme de ciertas amplitudes probabilísticas. Podríamos decir (ahora que el suceso nos ha hecho sensatos) que la esperanza de Schrödinger de que lo que había encontrado fuera una teoría ondulatoria de la estructura de la materia, no debería haber sobrevivido [81] al éxito de los contrastes de la interpretación estadística de Born de la teoría ondulatoria.

13. Mi decimotercera y última tesis es ésta: Tanto la física clásica como la cuántica son indeterministas [82]. La peculiaridad de la mecánica cuántica es el principio de la superposición de las amplitudes de ondas —un tipo de *dependencia probabilística* (llamada *interdependencia* por Landé) que aparentemente no tiene equivalente en la teoría clásica de la probabilidad. A mi modo de ver, eso parece un punto en favor de que puede decirse que las propensiones son físicas y reales (aunque virtuales, como ha resaltado Feynman). Porque la superposición puede recibir patadas: la coherencia (la fase) puede destruirse por medio de las disposiciones experimentales.

Alfred Landé ha hecho un intento muy interesante y parece que, al menos parcialmente, ha tenido éxito, de explicar esta peculiaridad mostrando matemáticamente esto [83]: «A la cuestión de *por qué interfieren las probabilidades* puede... contestarse: no tienen otra elección en absoluto si "quieren" obedecer una *ley general de la interdepen-*

---

en F. Bopp, ed., *Werner Heisenberg und die Physik unserer Zeit,* 1961, pp. 103-118; véase p. 104.

[81] *Cf.* E. Schrödinger, «The General Theory of Relativity and Wave Mechanics», en *Scientific Papers Presented to Max Born,* 1953, pp. 65-74.

[82] *Cf.* mi artículo, «Indeterminism in Quantum Physics and in Classical Physics», *British Journal for the Philosophy of Science,* 1, 117-133 y 173-195 (1950); y *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo [O. U.],* tomo II del *Post Scriptum; cf.* A. Landé, «Probability in Classical and Quantum Theory» en *Scientific Papers Presented to Max Born,* 1953, pp. 59-64; M. Born, «Bemerkungen zur statistischen Deutung der Quantenmechanik» (véase la nota 80, *supra*).

[83] *Cf.* A. Landé, *New Foundations of Quantum Mechanics,* 1965, p. 82; los subrayados son míos en parte.

dencia.» Supongamos que las brillantes derivaciones de Landé de la teoría cuántica a partir de principios no cuánticos de simetría resisten un análisis crítico: aun entonces, me parece que sus propios argumentos muestran que debe conjeturarse que aquellas probabilidades (propensiones) cuyas amplitudes puedan interferir, *son físicas y reales y no un simple artificio matemático* (como él mismo parece sugerir a veces). Aunque sus «imágenes» matemáticas puedan tener la forma de «ondas» sólo en el «espacio de configuración», *como propensiones* son físicas y reales, con total independencia de la cuestión de si pueden o no ser representadas por una imagen ondulatoria o por una función con forma de onda o si pueden ser representadas en absoluto por alguna imagen o forma. La imagen ondulatoria puede, pues, tener una significación matemática solamente; pero eso no ocurre con las leyes de la superposición que expresan una dependencia probabilística real. Por tanto, yo pienso que el modo en que la mecánica cuántica difiere fundamentalmente de la física clásica —es decir, en la interferencia de las ondas de propensiones— muestra que las ondas de propensiones pueden interactuar y son, por tanto, reales. Este es un argumento poderoso en favor de campos de propensiones; y si se acepta, seremos capaces de explicar las peculiaridades más características de la teoría cuántica.

Por otro lado, me parece que las fotografías de Compton-Simon dejan claro que los fotones pueden *recibir patadas y devolverlas,* y son, por tanto (a pesar de la opinión escéptica de Landé sobre su existencia), «*reales*» precisamente en el mismo sentido que el propio Landé ha dado al término. [Hay que admitir que son menos reales que, digamos, los electrones, porque los números de fotones no se conservan, mientras que los de electrones se conservan al menos en lo que pueden llamarse procesos «normales» (no, naturalmente, en la aniquilación de pares)[84]. Pero, después de todo, las mesas, las sillas y los cuerpos humanos tampoco se conservan (sobre todo, no se conservan sus números); y tampoco los átomos.]

Como siempre, nada depende de las palabras, pero el hablar del «dualismo de onda y partícula» ha creado mucha confusión, como resalta Landé con razón: tanta confusión que yo quiero apoyar su sugerencia de que se abandone el término «dualismo». Propongo que hablemos en cambio (como hizo Einstein) de la partícula y sus «*correspondientes*» campos de propensiones (el plural indica que los campos no dependen sólo de la partícula, sino también de otras condiciones), y evitemos así la sugerencia de una relación simétrica.

Si no se establece una terminología de este tipo *(«correspondencia»* en lugar de *«dualismo»)* el término «dualismo» perdurará, con todas las concepciones erróneas que lo acompañan; porque señala al-

[84] [Véase *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977, p. 7), *Ed.*].

go importante: la asociación que existe entre partículas y campos de propensiones («fuerzas», propensiones de desintegración, propensiones para la producción de pares y otros).

A propósito, entre los confusos términos de moda, está el término «observable» [85]. Sugiere algo que no existe: todos los «observables» *se calculan o infieren a partir de fundamentos teóricos* y no se observan ni se miden directamente. Así, lo que es «observable» depende siempre de la teoría que usemos. Sin embargo, uno no debiera, una vez más, discutir sobre las palabras; ni más ni menos sobre la palabra «observable» que sobre la palabra «real». Las definiciones, como de costumbre, no nos llevan a ningún lado; pero casi todos nosotros sabemos lo que queremos decir cuando decimos que *hay* cosas tales (cosas observables) como elefantes o electrones o campos magnéticos o (más difíciles de observar) propensiones, tales como la propensión a atraer o a comprender o a criticar; o la propensión de un experimento a producir un resultado especificado.

En resumen: el supuesto dualismo entre partícula y onda y la interpretación subjetiva de la probabilidad, con la que está estrechamente relacionada, son responsables de la interpretación subjetivista y antirrealista de la teoría cuántica y de afirmaciones tan características como esa de Wigner que dice que [86] «las leyes de la mecánica cuántica misma no pueden formularse... sin recurrir al concepto de conciencia»; una concepción que atribuye también a von Neumann; o la afirmación de Heisenberg: «La concepción de la realidad objetiva... se ha esfumado, así, ... en la transparente claridad de una matemática que no representa ya la conducta de las partículas, sino, más bien, nuestro conocimiento de esa conducta» [87]. O su aserción [88] de que si se expulsa al observador, y se hace objetiva a la física, la función Ψ «no contendrá física en absoluto».

He argüido a menudo en favor de la significción evolutiva de la conciencia y de su supremo papel biológico de captar y criticar ideas [89]. Pero su intrusión en la teoría probabilista de la mecánica cuántica me parece basada en mala filosofía y en unos cuantos erro-

[85] *Cf.* D. Bohm y J. Bub, «A Proposed Solution of the Measurement Problem in Quantum Mechanics by a Hidden Variable Theory», *Reviews of Modern Physics,* 38, 1969, pp. 453-69; véanse especialmente pp. 465 y ss.

[86] *Cf.* E. P. Wigner, «The Probability of the Existence of a Self-Reproducing Unit», en M. Polanyi, *The Logic of Personal Knowledge,* 1961, pp. 231-238; véase p. 232.

[87] *Cf.* W. Heisenberg, «The Representation of Nature in Contemporary Physics», *Daedalus,* 87, 1958, pp. 95-108.

[88] *Cf.* W. Heisenberg, «The Development of the Interpretation of the Quantum Theory», en W. Pauli, ed., *Niels Bohr and the Development of Physics,* 1955, pp. 12-29; véase p. 26.

[89] [Véase *Conocimiento objetivo (Obj. Kn.,* 1972) y *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977) *Ed.*].

res muy sencillos. Todos ellos, espero, serán pronto olvidados, mientras que los grandes físicos que los cometieron son recordados para siempre por sus magníficas aportaciones a la física: aportaciones de una importancia y una profundidad a las que ningún filósofo puede aspirar.

4. EL DERRUMBAMIENTO DEL PAQUETE DE ONDAS SIN OBSERVACION

*(Añadido en 1980). El argumento de la tesis 9 es, esencialmente, el de *L.I.C.* de 1934. Trata principalmente de la llamada «reducción del paquete de ondas», o, lo que es lo mismo, el «derrumbamiento del vector de estado» y puede reforzarse mucho.

Tal como está, se refiere al impacto de cualquier nueva *información* sobre una probabilidad: muestra que una probabilidad *p(a,b)* puede ser sustituida, a causa de la nueva información *c,* por *p(a,bc).* Y muestra que, si *a* es la posición final de una bola en un billar romano, la información *c* de que la bola ha golpeado una cierta clavija puede, desde luego, alterar considerablemente la probabilidad de *a;* puede, por ejemplo, reducirla a cero.

En este argumento, el término «información» juega un papel considerable; por esta razón puede decirse que tiene un cierto sabor subjetivista. Puede parecer que el «observador» no ha sido exorcizado por completo. El propósito principal de esta sección es mostrar que, con ayuda de la interpretación propensivista de la probabilidad (que no desarrollé hasta poco antes de 1953)[90], el exorcismo es total.

Sin embargo, antes de proceder a mostrar esto, quiero decir algo en defensa de la objetividad del argumento de la tesis 9. La información que cumple una función en esa sección y que lleva a la reducción del «paquete de ondas» es información sobre *hechos objetivos,* hechos que son totalmente independientes de ningún «observador»: el *hecho,* por ejemplo, de que una bola haya golpeado o no cierta clavija del billar. Así pues, la objeción de que, al hablar de información, he introducido ilícitamente al observador, no puede sostenerse. No obstante, podemos deshacernos de toda referencia, directa o velada, a la información o al conocimiento o a cualquier cosa que tenga un sabor subjetivista.

Tomemos, una vez más, el ejemplo del billar romano. El «billar

[90] *Cf.* mi «Philosophy of Science. A Personal Report», presentado en 1953 e impreso en C. A. Mace, ed., *British Philosophy in the Mid-Century,* 1957, esp.. pp. 188 y ss.; reimpreso en *El desarrollo del conocimiento científico [C. & R.,* 1963]. *Cf* también mi «The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability, and the Quantum Theory», en Körner, ed., *Observation and Interpretation, op. cit.*

romano normal» que estoy usando aquí consiste en una serie de hileras de clavijas; y cada clavija en cada hilera está a una distancia constante de cada una de las otras clavijas en esa hilera. La colocación de las clavijas en cada hilera sucesiva es escalonada, de modo que las clavijas están situadas a medio camino con respecto a las de la hilera anterior. Cada bola tiene el tamaño preciso para pasar justo por el espacio constante entre dos clavijas.

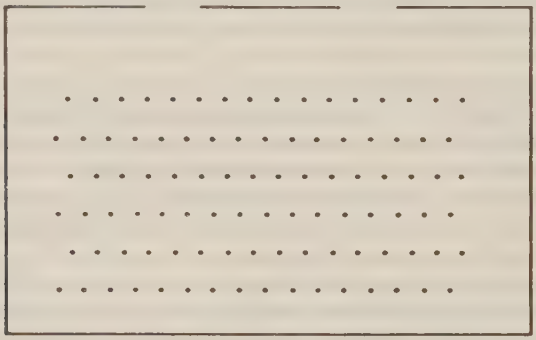

FIGURA 3

El billar romano normal tiene una importancia considerable porque puede servir como un ejemplo extremadamente sencillo de un mundo probabilista: un mundo en el que toda ocurrencia —es decir, el golpear de una bola en una clavija— da lugar a una elección probabilística de ocurrencias de probabilidad 1/2: un paquete de ondas o un vector de estado representan dos estados posibles y equiprobables, cada uno de los cuales tiene, a su vez, el mismo carácter y así sucesivamente, mientras queramos, hasta una hilera «final» en la que escogemos una clavija determinada. El golpear esa clavija es nuestra ocurrencia *a; p(a,x)* es la probabilidad de que la bola golpee esa clavija escogida, *a,* cuando la situación es *x.*

Ahora bien, la interpretación propensivista considera las propensiones como propiedades físicas objetivas de la situación física bajo consideración y, en último término, de la totalidad del mundo físico. En consecuencia, la propensión objetiva de la ocurrencia *a* —descrita por *p(a,x),* un paquete de ondas o un vector de estado— cambio cada vez que una bola ha «decidido» pasar a la izquierda de alguna clavija. Cambia porque *x* cambia objetivamente con cada ocurrencia.

Que estemos o no «informados» de la ocurrencia (del valor de *x*) no tiene ninguna importancia: es la propensión objetiva de *a* la que puede hacerse cero, con o sin nuestro conocimiento.

De modo que aquí es el propio mundo físico —la propensión— el que cambia, y cuyo cambio se describe por medio del «derrumbamiento del vector de estado». Y ésta es precisamente una característi-

ca que distingue un mundo probabilista de un mundo determinista —un mundo en el que no hay alternativas; o, para expresarlo de un modo diferente, un mundo en el que todas las probabilidades o propensiones objetivas son o cero ó 1.

Creo que este modelo trivial del mundo, el billar romano, es, en muchos aspectos, similar al mundo que retrata la mecánica cuántica. En general, no hay más que una diferencia: en el universo modelo no tenemos fase ni coherencia de fase. Así pues, no tenemos interferencia de probabilidades: nuestras probabilidades pueden adicionarse, pero no sus amplitudes —como ya resalté en mis tesis 8 y 9.

Podemos, desde luego, tratar de simular el experimento de las dos ranuras haciendo que las bolas desciendan por el tablero del billar a través, digamos, de dos ranuras *A* y *B*. Pero eso no llevará más que a la superposición aditiva de dos distribuciones gaussianas en lugar de a las superposiciones de las amplitudes de las ondas de probabilidades. La razón es obvia: en nuestro modelo no podemos simular nada parecido a la fase y la coherencia.

Una cosa que nuestro modelo muestra con mucha claridad es la simetría del tiempo, es decir, el hecho de que la dirección del tiempo puede ser invertida en nuestro mundo modelo. Si consideramos cualquier ocurrencia determinada —cualquier golpe de cualquier bola en cualquier clavija— entonces, no sólo podemos preguntar la distribución de las probabilidades para conocer el avance de la bola, sino que también podemos preguntar la distribución de las probabilidades para el curso pasado de la bola. Vemos al instante que esos dos problemas son exactamente simétricos: igual que hay una probabilidad de 1/2 de que una bola *B* que ha chocado con la clavija *c* choque con cualquiera de las dos clavijas más próximas de la próxima hilera, de la misma manera, hay una probabilidd de 1/2 de que la bola *B* haya golpeado, antes de golpear a *c*, a cualquiera de las dos clavijas más próximas a *c* en la hilera anterior. Así, operando hacia atrás de esta forma podemos obtener distribuciones que son exactamente simétricas a las distribuciones (gaussianas) que obtenemos operando hacia adelante.

Esto, creo yo, ilustra perfectamente la famosa reversibilidad del tiempo de la ecuación de Schrödinger.

5. LA INTERPRETACION DE EVERETT DE «MUCHOS-MUNDOS»

*(Añadido en 1981). Estos resultados pueden aplicarse a una discusión de la famosa «Interpretación de Muchos-Mundos» de la mecánica cuántica, debida esencialmente a Hugh Everett, III, y expues-

ta de forma interesante por John Archibald Wheeler, Neill Graham y Bryce S. DeWitt [91].

En mi opinión, las contribuciones de Everett son excelentes, aunque no creo que logren lo que se proponen, sobre todo en el libro editado por DeWitt y Graham.

Las tres principales contribuciones de Everett me parecen ser las siguientes:

1) La de Everett es una discusión completamente *objetiva* de la mecánica cuántica.

2) En el enfoque de Everett (al contrario del de la interpretación de Copenhague), no hay necesidad ni ocasión para distinguir entre sistemas físicos «clásicos», como el aparato de medir, y los sistemas mecánico-cuánticos, como las partículas elementales y los sistemas (pequeños) de partículas elementales (por ejemplo, moléculas o grupos de moléculas). En cambio, todos los sistemas físicos se consideran sistemas mecánico-cuánticos, especialmente el aparato usado en las mediciones; y, desde luego, el universo.

3) Everett muestra que el derrumbamiento del vector de estado —algo que antes de él se había considerado como ajeno a la teoría de Schrödinger— surge *dentro* de lo que él llama la «teoría de la Función Universal de Ondas [de Schrödinger]».

El tercero de estos puntos surge de mi propia interpretación de la teoría de Everett. (La contradice, por ejemplo, DeWitt, que mantiene que «el derrumbamiento del vector de estado no es el resultado de las ecuaciones de Schrödinger» [92]. Sin embargo, quizá DeWitt quiera decir solamente que no es el resultado de ellas a menos que adoptemos algo parecido al argumento de Everett.)

Espero que todo el mundo esté de acuerdo conmigo en que los dos primeros de mis tres puntos son aspectos importantes del tratamiento de Everett.

Hay varios aspectos del tratamiento de Everett, o de la interpretación que de él hace DeWitt, que me parecen debidos a malentendidos. Mencionaré algunos de ellos.

Está, en primer lugar, la llamada «interpretación de muchos-mundos de la mecánica cuántica» o la tesis algo sensacionalista de que el mundo se divide, con cualquier interacción mecánico-cuántica, en

[91] Véase Bryce S. DeWitt y Neill Graham, eds., *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics,* 1973, que incluye el artículo de Hugh Everett, III, «"Relative State" Formulation of Quantum mechanics», en *Reviews of Modern Physics,* 29, 3, pp. 454-462, julio 1957.

[92] DeWitt y Graham, eds., *op. cit.*, p. 159, último párrafo de la columna de la izquierda.

muchos mundos. Trataré de mostrar, más adelante, que eso es insostenible.

Está, en segundo lugar, la afirmación de que la interpretación de Everett es una consecuencia directa del formalismo matemático, sin ningún supuesto adicional (si se exceptúa un «postulado de complejidad», como lo llama DeWitt: «El mundo es suficientemente complicado como para que pueda ser descompuesto en sistemas y aparatos» [93]). Es parte de esta afirmación decir que la interpretación de Everett está exenta de supuestos «metafísicos». También mostraré que esa afirmación es insostenible.

No obstante, no debe considerarse que mi argumento quiere quitar importancia al logro de Everett ni a su originalidad.

El argumento de Everett es simple e ingenioso. Analiza la mecánica cuántica de sistemas más o menos complejos que se consideran (suficientemente) aislados del resto de nuestro mundo. Lo que es válido para esos sistemas puede ser extendido a todo el universo.

Los sistemas físicos *X* especialmente investigados por Everett son aquéllos que contienen un subsistema *A* que consta de un aparato (un ordenador) que puede medir algunos de los llamados «observables» de un subsistema *B* de *X* y registrar la medición en un subsistema físico de *A*, llamado metafóricamente la «memoria» de *A*.

Puede considerarse que el subsistema *B* cuya evolución registra *A* (por cuestión de simplicidad) es nuestro billar romano regular; y puede considerarse que *A* mide y registra la probabilidad de que una bola avance por uno de sus posibles caminos hacia el pie del tablero. Estas probabilidades estarán representadas por un «paquete de ondas» o «vector de estado»; y una medición (de la posición de la bola) puede ser, o no, la ocurrencia [94] de que la bola golpee cierta clavija. Si lo es, entonces la «medición» llevará al «derrumbamiento» del vector de estado previo, en los sentidos descritos anteriormente en la tesis 9 y en la sección 4.

En la medida en que el sistema físico *A* registra el derrumbamiento del vector de estado, muestra la objetividad física de este derrumbamiento: Everett muestra que el derrumbamiento es parte de la teoría objetiva de la mecánica cuántica.

Hasta aquí, muy bien.

Pero Everett ha dado una interpretación a sus resultados [95] que yo considero claramente metafísica. La motivación de esta interpretación es muy sencilla. La teoría de la mecánica cuántica, digamos que en la forma de la ecuación de Schrödinger, no predice (como toda teoría

---

[93] *Ibíd.*, p. 160.

[94] *Cf.* mi discusión de «ocurrencia» y «suceso», en *L.I.C. [L.Sc.D.]*, sección 23, pp. 84-87.

[95] En su artículo de 1957, citado en la nota 91, *supra*.

probabilista) cuál de los posibles caminos que le están abiertos, escogerá el sistema. Everett dice —quizá porque cree que sólo de esta manera se conservará la objetividad de la teoría— que «con cada observación sucesiva» el estado del sistema «se ramifica en varios estados diferentes. Cada rama representa» uno de los posibles «resultado[s] diferente[s] de la medición y del *correspondiente* estado característico para el estado del objeto-sistema [*B*]. Todas las ramas existen simultáneamente... después de cualquier sucesión dada de observaciones».

Esta concepción de Everett puede ser ilustrada por nuestro modelo de billar romano, enriquecido por un ordenador *A* que observe y registre. Equivale a la aserción de que (igual que el vector de estado que determina los *dos* estados posibles siguientes, después de que cualquier estado «medido» determine *objetivamente dos* estados) habrá una división de nuestro sistema *X* (billar romano *B* + ordenador *A*, o *A* + *B*) en dos sistemas: $X' = A' + B'$ y $X'' = A'' + B''$, cada uno de los cuales realizará una de las posibilidades objetivas predichas. Naturalmente, en *X'*, *A'* registrará un vector de estado que represente el estado (posibilidades futuras) de *B'*, mientras que en *X''*, *A''* registrará el vector de estado que represente el estado (posibilidades futuras) de *B''*.

En otras palabras: a cada ocurrencia (una bola golpeando una clavija) nuestro sistema *X* (es decir, tablero + ordenador) se duplica. (En un *B* más complicado, en donde se abran más de dos posibilidades con cada interacción, el sistema *X* se dividirá en *n* sistemas, siendo *n* el número de posibilidades abiertas por la ocurrencia en *B*).

Cada uno de los muchos mundos (sistemas) que siguen a una división (una ocurrencia) representa uno de los mundos posibles —uno de los mundos que siguen siendo posibles después de la ocurrencia (o sea, la medición) que llevó a la división.

Está claro que, puesto que cada uno de esos mundos es *idéntico* a uno de los mundos que podían haber surgido realmente, de acuerdo con el sentido común, no habrá interacción entre ellos: ningún habitante de uno de ellos advertirá nada sobre los otros mundos ni advertirá nada que no pudiera ocurrir en un mundo de sentido común.

Por tanto, la interpretación de Everett no se hace imposible por el hecho de que no experimentemos la continua división de nuestro mundo (lo que significa que nosotros mismos nos dividimos continuamente). Como él mismo señala, no resulta contradicha por el hecho de que no notemos la división, de la misma manera que la teoría de la rotación de la tierra no resulta contradicha por el hecho de que nosotros no notemos el movimiento.

No obstante, yo creo que la interpretación de Everett de los muchos-mundos es insostenible; no porque choque con la experien-

cia inmediata, o con el sentido común, sino porque choca con la teoría física que él cree estar siguiendo fielmente.

Hay muchos conflictos de esta índole. Algunos quizá puedan resolverse por algo muy parecido a los alegatos especiales. Pero otros son, en mi opinión, absolutamente fatales para su teoría.

Entre los conflictos que pueden resolverse recurriendo a alegatos especiales, están los relacionados con las leyes de conservación —la conservación de la energía (masa-energía), del momento, del momento angular, etc.—. Estas leyes serían drásticamente violadas, obviamente, con cada división.

La solución sería decir que esas leyes son válidas *dentro* de cada uno de los sistemas que se ramifican, pero no dentro de los sistemas de sistemas que se ramifican.

Esto puede decirse, desde luego, pero existe una fuerte objeción a esta solución: la única razón para introducir las divisiones, y los muchos mundos, es que una parte de la teoría *física* —la que se refiere a las posibilidades que puede adoptar un sistema— puede tomarse como una descripción literal de la realidad física total efectiva en vez de tomarse como descripción de las posibilidades alternativas entre las que el sistema puede escoger (como en el caso del billar romano). Pero entonces, la solución mencionada dice que las leyes de conservación no deben tomarse literalmente —ni siquiera aquellas que son entrañadas por la misma ecuación de Schrödinger que sirve de base a la teoría de Everett.

Me parece que esta solución no es, en absoluto, aceptable.

(Por cierto, vemos claramente, incluso en esta etapa, que la interpretación de los muchos mundos no se deriva directamente, como se ha pretendido, del formalismo físico.)

Pero todavía es posible una crítica más fuerte.

La ecuación de Schrödinger es simétrica con respecto a una inversión de la dirección del tiempo —de la misma manera que nuestro billar romano, como se ha explicado al final de la sección 4.

Pero eso significa que si aceptamos la teoría de las divisiones de Everett, es decir, la realidad de cada posibilidad con respecto al futuro, tenemos que aceptar también lo contrario —que ocurra constantemente la *fusión de una infinidad*[96] *de mundos reales* en el momento de cada ocurrencia. Esto es inevitable en la teoría de Everett, porque ésta tiene que conservar una de las simetrías más importantes de la teoría formal que pretende interpretar.

Marquemos el momento de tiempo en el que hacemos una preparación de estado o una observación t_1. El uso normal de la ecuación

[96] A propósito, se ve claramente que el número de los «muchos» mundos de la teoría de Everett es infinito, incluso si el sistema de objetos *B* es simplemente un átomo de hidrógeno y que la infinitud corre pareja con la potencia del continuo.

de Schrödinger es preguntar qué ocurrirá en t_2 (donde $t_1 < t_2$). Según la interpretación de Everett, si hay dos posibilidades que puedan predecirse con la probabilidad de, digamos, 1/2, entonces el mundo se dividirá en dos y cada una de las probabilidades se realizará en uno de los mundos.

Pero también podemos usar la ecuación de Schrödinger para preguntar a partir de qué estados, en t_0, puede haber surgido el estado en t_1. De nuevo la respuesta puede ser «a partir de dos estados, cada uno de ellos con la probabilidad de 1/2». Yo creo que está claro que la interpretación de Everett exigiría en este caso, por razones de simetría, que el estado en t_1 surgiera de la fusión de los estados en t_0. Puesto que el formalismo es simétrico, también la interpretación tiene que serlo.

Everett y sus comentaristas no dicen ni una palabra sobre esto; y, desde luego, es muy difícil decir algo en defensa de esta concepción del mundo —sobre todo una vez que se ha mostrado que la interpretación de los muchos-mundos no es consecuencia (y, por tanto, no es parte integral) del formalismo de la mecánica cuántica, sino una interpretación *más o menos* (pero admitamos que no totalmente) arbitraria del formalismo y ciertamente metafísica (como lo es, lo admito tranquilamente, la concepción, según el sentido común, del billar romano, o mi interpretación propensivista).

Pero aún hay más dificultades, planteadas por la situación de la reversibilidad del tiempo. Una es ésta: la onda de Schrödinger tiene, formalmente, un carácter determinista; sólo se hace probabilista por medio de nuestra interpretación (la interpretación de Born, que corresponde a la interpretación del sentido común del mundo como billar romano). Un argumento que menciona Everett en apoyo de su interpretación de muchos-mundos es que preserva el carácter determinista en la interpretación de las ondas de Schrödinger: si se realizan todas las posibilidades que abre la onda, entonces, es cierto que la realidad está predeterminada por cualquier estado descrito por una solución de la ecuación de ondas.

Esto puede ilustrarse claramente con cualquier experimento de preparación de estado, por ejemplo, de un haz de partículas seleccionadas por una ranura estrecha.

Cada partícula del haz que se dispersa puede considerarse como un análogo de uno de los mundos en división de Everett; y todo el haz como un análogo de la realidad según Everett —los muchos mundos que, como se ve aquí, no sólo son muchos sino que además se dispersan de forma aleatoria los unos respecto a los otros.

Invirtamos ahora la dirección del tiempo. Entonces vemos que los muchos mundos del pasado son una dispersión aleatoria [97], pero dis-

[97] Obtenemos el mismo absurdo si aplicamos la ecuación de Schrödinger a un gra-

puestos de tal forma que cuando se funden entran en correlación, *aunque no existía interacción entre ellos antes de su fusión.*

Puedo añadir sólo que si consideramos la fusión de las memorias, la situación se hace claramente absurda y dificilísima de describir.

Está claro que la tendencia realista tras esta teoría puede realizarse de una forma menos absurda. De hecho, se realiza con la interpretación propensivista que, admitámoslo, no es más deducible a partir del formalismo de lo que lo es la interpretación de Everett. Pero al considerar las propensiones como físicamente reales (y, por cierto, dotadas de una dirección temporal) podemos decir que la ecuación de Schrödinger describe una realidad física: y el derrumbamiento del vector de estado puede «justificarse» dentro de la teoría por medio del ingenioso argumento de Everett [98].

---

mo de alguna sustancia radiactiva y luego giramos la flecha del tiempo por completo, de forma que la sustancia se integre en lugar de desintegrarse. La situación es posible pero improbable en extremo. Véanse mis notas en *Nature* sobre la Flecha del Tiempo *(Nature,* 177, 1956, núm. 4.507, p. 538; *Nature,* 178, 1956, núm. 4.529, p. 382; *Nature,* 179, 1957, núm. 4.573, p. 1.297; *British Journal for the Philosophy of Science,* 8, 1957, núm. 30, pp. 151-155; *Nature,* 181, 1958, núm. 4.606, pp. 402-403; *Nature,* 207, 1965, núm. 4.994, pp. 233 234; *Nature,* 213, 1967, núm. 5.073, p. 320; y *Nature,* 214, 1967, núm. 5.085, p. 322).

[98] [Popper presenta su interpretación propensivista en *Realismo y el objetivo de la ciencia* (tomo I del *Post Scriptum*), y a lo largo del presente volumen, y también en *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo* (tomo II del *Post Scriptum*.) La expuso por primera vez en 1953, en el transcurso de unas conferencias publicadas en C. A. Mace, ed., *British Philosophy in the Mid-Century,* 1957, pp. 188 y ss. (Reimpreso en *El desarrollo del conocimiento científico* [*C. & R.,* 1963], capítulo 1). Véase también H. D. Lewis, ed., *Contemporary British Philosophy,* 1956, p. 388 (Reimpreso en *El desarrollo del conocimiento científico [C. & R.],* capítulo 3). *Ed.*].

TEORIA CUANTICA Y EL CISMA EN FISICA

CAPITULO PRIMERO

COMPRENSION DE LA TEORIA CUANTICA Y DE SUS INTERPRETACIONES

A los críticos de la interpretación de Bohr y de Heisenberg de la teoría cuántica se les descarta, por lo general, como reaccionarios que suspiran por los viejos tiempos —los tiempos de la física clásica, los tiempos en los que las teorías no eran abstractas, sino que era posible formarse una imagen mental con ayuda de modelos mecánicos; y los tiempos del determinismo. Por tanto, supongo que conviene que repita que admiro ardientemente las nuevas ideas, sobre todo en física, incluidas las ideas que no han tenido éxito. También estoy convencido de que el carácter «abstracto» de una nueva teoría no es un argumento en contra suya, y que lo que le parece «abstracto» a una generación de físicos puede no parecérselo ya a la siguiente. (Podrían ponerse muchos ejemplos para ilustrar lo que digo.) Y, puesto que tengo que volver a hacer hincapié en ello, soy indeterminista [1].

Dediqué gran parte de *La lógica de la investigación científica (L.I.C.)* a los problemas de la teoría cuántica. Pero la teoría cuántica es también un área en la que mis ideas han evolucionado y han cambiado algo; y pretendo presentar mi pensamiento actual sobre esas cuestiones en las páginas que siguen [2]. Antes de entrar en detalles,

---

[1] [Véase *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo [O. U.]*, volumen II del *Post Scriptum a la lógica de la investigación científica. Ed.*].

[2] [Desde que se escribió este tomo del *Post Scriptum* a mediados de la década de 1950, Popper ha publicado una serie de ensayos en los que desarrolla sus ideas sobre la física cuántica. Entre ellos se incluyen: «The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability, and the Quantum Theory», en *Observation and Interpretation:* Proceedengs of the Ninth Symposium of the Colston Research Society, Bristol, ed. S. Körner, 1957, pp. 65-70 y 88-9; «The Propensity Interpretation of Probability», en *The British Journal for the Philosophy of Science,* 10, 1959, pp. 25 42; «Philosophy and Physics» *Atti del XII Congresso Internazionale di Filosofia,* Venecia, 1958, 2, 1960, pp. 367-74; «Quantum Mechanics Without the "Observer"», en *Quantum Theory and Reality,* ed. Mario Bunge, 1967, pp. 7-44, reimpreso como Introducción al presente volumen; «Birkhoff and von Neumann's Interpretation of Quantum Mechanics», *Nature,* 219, 17 de agosto de 1968, pp. 682-5; «Quantum Theory, Quantum Logic and the Calculus of Probability», en *Akten des XIV Internationalen Kongresses für Philosophie* III, Viena, 1969, pp. 307-313; «A Realist View of Logic, Physics and History», en Wolfgang Yourgrau y Allen D. Breck, eds., *Physics, Logic and History,* 1970, pp. 1-30, 35-37; «Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky and Rosen», en Wolfgang Yourgrau y Alwyn van der Merwe, eds , *Perspectives in Quantum Theory: Es-*

quiero enunciar brevemente cinco puntos que indican cómo han cambiado mis ideas actuales respecto a mis ideas anteriores sobre la mecánica cuántica.

1) Un argumento, que se refería a la teoría cuántica, sobre el que puse mucho énfasis en el texto de *L.I.C.* —el experimento imaginario descrito en la sección 77— no es válido y quiero retirarlo [3]

2) No obstante, creo que mi anterior crítica a la interpretación de Heisenberg y de Bohr de la teoría cuántica —normalmente denominada ahora interpretación de Copenhague— es válida. Se sostiene por sí sola. Además, mi propio experimento, no válido, puede ser sustituido por otro que lo es, el famoso experimento imaginario de Einstein, Podolsky y Rosen.

3) Además de mi antigua crítica a la «interpretación de Copenhague», sostengo mi *tesis positiva de que el problema de interpretar la teoría cuántica está ligado al de interpretar la teoría de la probabilidad.* Así pues, la teoría cuántica tendría que interpretarse como una teoría estadística sobre agregados (o «colectivos») en el caso de que la teoría de la probabilidad tuviese que ser interpretada de ese modo.

4) Pero si la teoría de la probabilidad puede interpretarse como una teoría de las propensiones —en el sentido de los tomos I y II de este *Post Scriptum*— entonces la teoría cuántica puede interpretarse del mismo modo. Es más, si, en efecto, interpretamos la teoría cuántica como una teoría de las propensiones físicas, entonces podemos resolver todas esas dificultades que han dado lugar a la interpretación de Copenhague.

5) Cuando, a principios de la década de los treinta, ataqué por primera vez lo que ahora se llama la interpretación de Copenhague, me preocupaban las tendencias anti-racionales inherentes a ella. En aquel momento sugerí que la interpretación subjetiva de la probabilidad era la responsable de ello: en efecto, la interpretación subjetiva

---

says in Honor of Alfred Landé, 1971, pp. 182-198; y «A Realist View of Logic, Physics and History» (Consideración realista de la Lógica, la Física y la Historia), capítulo 8 de *Conocimiento objetivo (Obj. Kn.*, 1972). Véase también la autobiografía intelectual de Popper y las réplicas a sus críticos en P. A. Schilpp, ed., *The Philosophy of Karl Popper*, 1974, pp. 71-77, 101-105, 108-110, 121-133, 1.053-1.058, 1.125-1.144. La autobiografía intelectual de Popper se ha vuelto a publicar como *Unended Quest*, 1976, y las referencias serán normalmente a la última edición (la autobiografía está traducida al español como *Búsqueda sin término: Una autobiografía intelectual*, Madrid, Editorial Tecnos, 1977; las referencias se harán, aquí, a la traducción). Dos de los artículos que acabamos de citar —«Birkhoff and von Neumann's Interpretation of Quantum Mechanics», 1968, y «Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky and Rosen, 1971— contienen algunos puntos y argumentos que Popper no sostiene ya. Véase el «Prefacio de 1982» al presente tomo, y también J. S. Bell, «Quantum Mechanical Ideas», *Science*, 177, 8 de septiembre, 1972. *Ed.*].

[3] [Véase la discusión del experimento imaginario de Popper y de su relación con el argumento de Einstein, Podolsky y Rosen en el «Prefacio de 1982» a este tomo del *Post Scriptum*. *Ed.*].

induce a sus adictos a aficionarse a una droga intelectual, más peligrosa incluso (porque es incluso más narcótica), la *mezcla* de las interpretaciones subjetiva y objetiva de la probabilidad. Desde entonces he aprendido mucho y he cambiado de opinión en un punto fundamental (véase el tomo I, parte 2); he renunciado a la interpretación frecuencial en favor de la propensivista. (Las dos son interpretaciones *objetivas.)* Pero estoy convencido, más firmemente que nunca, de que la mezcla mortal de las interpretaciones objetiva y subjetiva de la probabilidad ha creado todos esos síntomas irracionales, tales como el sueño de la interferencia teórico-cuántica del sujeto con el objeto del conocimiento.

Lo que no vi hace veinte años fue la estrecha conexión entre esta mezcolanza y la interpretación determinista de la física clásica[4]. Al final, bien puede resultar que el prejuicio determinista inconsciente sea el principal culpable de la teoría subjetiva de la probabilidad y de sus consecuencias —la invasión de la física por la mística.

1. UN CISMA EN FISICA

Desde el otoño de 1934, en que publiqué por primera vez *La lógica de la investigación científica (L.I.C.),* ha habido muchas discusiones sobre el problema de *interpretar el formalismo de la teoría cuántica.* Sin embargo, no creo que se haya progresado mucho, aparte del artículo, de fundamental importancia, de Einstein, Podolsky y Rosen, que se analizará en la sección 17.

Un aspecto notable de esas discusiones fue el desarrollo de una división en física. Emergió algo que puede describirse con justicia como una ortodoxia cuántica: una especie de partido o de escuela o de grupo, dirigido por Niels Bohr, con el apoyo muy activo de Heisenberg y Pauli; simpatizantes menos activos fueron Max Born y P. Jordan y quizá incluso Dirac. En otras palabras, todos los hombres más grandes de la teoría atómica pertenecían al grupo, menos dos grandes hombres que disintieron con fuerza y consistencia: Albert Einstein y Erwin Schrödinger. Durante un tiempo, después de proponer su nada ortodoxa teoría de las ondas piloto, Louis de Broglie pareció haberse unido a la ortodoxia; pero más tarde volvió a disentir, animado por el redescubrimiento de David Bohm de esas ondas piloto. Y Alfred Landé, que durante muchos años estuvo de acuerdo con la postura de Bohr, también disintió más tarde, por razones bastante distintas; en realidad, simplemente a consecuencia de un decidido esfuerzo por *entender.*

[4] [Véase la discusión de Popper del determinismo en *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo* (O. U.), tomo II de este *Post Scriptum. Ed.*].

Al contrario que los ortodoxos, los disidentes se hallan lejos de estar unidos. No hay dos entre ellos que estén de acuerdo (excepto, quizá, de Broglie y Bohm).

Hay incluso un tercer grupo de físicos, y quizá sea el más numeroso. Lo forman los que han dado la espalda a esas discusiones porque las consideran, con toda razón, filosóficas, y porque creen, sin ninguna razón, que las discusiones filosóficas no son importantes para la física. A este grupo pertenecen muchos de los físicos más jóvenes que han crecido en un momento de super-especialización y en la nueva tradición, que está desarrollándose actualmente, del culto a la estrechez y del desdén por la generación más vieja, formada por no especialistas (cuyos miembros les parecen antediluvianos): una tradición que puede llevar fácilmente al fin de la ciencia y a su sustitución por la tecnología.

¿Cuál es la significación de esta disensión? Hay dos cuestiones estrechamente relacionadas. «... Todos los físicos convienen», escribe Pauli [5], «en que la actual teoría cuántica, que es insuficiente para explicar la naturaleza atomística de la electricidad y... los valores-masa de las partículas "elementales"... sólo puede tener una esfera limitada de aplicación». Dicho de otro modo, todos los físicos convienen en que hace falta una nueva teoría, a pesar del maravilloso éxito de la teoría cuántica. Algunos lo admiten de mala gana, mientras que algunos disidentes señalan que la teoría actual está, en realidad, refutada en diversos puntos, aunque ninguna de las refutaciones es inequívoca. (Las refutaciones rara vez son totalmente inequívocas: podemos recordar el perihelio de Mercurio.) Algunos disidentes tienen la impresión de que los que pertenecen a la ortodoxia se inclinan a restar importancia a esos puntos o a echar tierra sobre ellos por medio de reinterpretaciones. Esta es una de las cuestiones.

2. LA SIGNIFICACION DE LAS INTERPRETACIONES

La segunda cuestión es, quizá, más importante. Puesto que todos los físicos, como dice Pauli, tienen la esperanza de que se reforme la teoría, existe el problema de cómo buscar esa reforma. Hay, principalmente, dos métodos. Uno es reflexionar sobre el formalismo matemático y tratar de alterarlo y, si es posible, generalizarlo. El otro es tratar de interpretar el formalismo, de entenderlo desde el punto de vista físico, con la esperanza de obtener una mayor comprensión de sus dificultades e imperfecciones físicas.

Estos dos métodos (si puede llamárseles así) no tienen por qué ex-

[5] «Editorial», *Dialectica*, 2, 1948, p. 311; *cf.* también *Les Prix Nobel en 1946*, p. 146.

cluirse mutuamente. Sin embargo, la principal cuestión en juego es, sin duda, la cuestión entre ellos. Porque la ortodoxia ha adoptado una perspectiva que es compatible sólo con el primer método: dar vueltas al formalismo. Contrariamente a esto, cada uno de los disidentes ha propuesto nuevas interpretaciones físicas en un intento de *entender* la situación física.

Si queremos considerar con más atención esta última cuestión, que yo encuentro más importante —el problema de *entender* nuestras teorías— entonces podemos percibir que el partido ortodoxo representa, en su actitud hacia la teoría cuántica, una teoría filosófica sobre la naturaleza de la ciencia que entraña la futilidad del intento de los disidentes de entender. Es la concepción de que no hay nada que entender: que no podemos hacer otra cosa que *dominar el formalismo matemático* y aprender a *aplicarlo*. Esta concepción, que Bohr y otros miembros de la ortodoxia se han esforzado en establecer, la dan prácticamente por sentada los miembros del tercer grupo, al que pertenecen la mayoría de los físicos más jóvenes y más duros. He llamado a esta concepción «*instrumentalismo*» o, de un modo más completo, «*la interpretación instrumentalista de las teorías científicas*» [6]. Es la concepción de que todas las teorías científicas, o algunas, no son *nada más* que formalismos matemáticos que tienen aplicaciones útiles, en especial para la predicción de los resultados de los experimentos. El énfasis está aquí en «nada más»; porque todo el mundo, incluso los realistas más ardientes, admiten, naturalmente, que las teorías son *también* formalismos y que son instrumentos estupendos para las predicciones y para otras aplicaciones.

Así, la concepción instrumentalista es ampliamente aceptada hoy, pero su victoria fue preparada por la interpretación de Bohr de la teoría cuántica.

No todo el mundo está satisfecho con esta situación. Resulta especialmente poco satisfactoria para aquéllos que no ven en la física principalmente un instrumento para las predicciones u otras aplicaciones prácticas, sino, más bien, un instrumento (si es que tiene que ser instrumento por fuerza) para entender el mundo en que vivimos —para *explicar* este mundo. Esto se vio muy claramente, por ejemplo, en la larga discusión entre Bohr y Einstein, que duró desde 1927 hasta 1949 [7] y que Einstein continuó hasta 1953 [8]. Los realistas, co-

---

[6] [Véase Popper, *Realismo y el objetivo de la ciencia (R. & A. of Sc.)*, tomo I de este *Post Scriptum*, secciones 10-16; también *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.)*, capítulo 3. *Ed.*].

[7] *Cf.* Niels Bohr, «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», en P. A. Schilpp, ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, 1949.

[8] *Cf.* A. Einstein, «Elementare Ueberlegungen zur Interpretation der Grundlagen der Quantenmechanik», en *Scientific Papers Presented to Max Born*, 1953. Este debe de haber sido uno de los últimos artículos de Einstein, si no el último.

mo Einstein y Schrödinger, piensan que las teorías no son sólo instrumentos sino que son, además, intentos de describir una realidad física. «Yo (creo) en un mundo de algo que tiene una existencia objetiva que yo trato de capturar mediante teorías osadamente especulativas», escribió una vez Einstein a Born [9]. Naturalmente, Einstein creía que sus teorías «osadamente especulativas» tenían que ser severamente contrastadas y, por esa razón, *tenían* que ser instrumentos de predicción. Pero lo que él perseguía (aunque sabía que sería muy difícil de capturar) era el mundo real, del que esperaba dar una descripción verdadera.

Nada más fácil que denunciar este tipo de declaraciones como metafísicas, filosóficas o carentes de sentido. «Lo que queremos son hechos y números», oímos por todas partes, «no discusiones filosóficas». Algunos físicos inflexibles de la generación actual parecen no tener interés por tales discusiones, o, si lo tienen, se las dejan a Niels Bohr. En lo que están interesados es en 1) *un formalismo,* y 2) *su aplicación;* y nada más.

Pero este instrumentalismo, esta actitud, tan de moda, de ser duro y no soportar necedades —especialmente necedades filosóficas— es, ella misma, una vieja teoría filosófica, por muy moderna que nos pueda parecer. Durante mucho tiempo, la Iglesia utilizó la concepción instrumentalista de la ciencia como un arma contra una ciencia naciente. «Podréis forjar instrumentos, artefactos, pero no podréis, con la luz de vuestra sola razón, descubrir ninguno de los secretos ocultos de este mundo»: éste es, en breve, el argumento con el que el cardenal Bellarmino se opuso a las enseñanzas de Galileo sobre el sistema copernicano y con el que el obispo Berkeley se opuso a Newton.

He contado un poco de esta historia en otro lugar [10], donde también traté de mostrar que la filosofía instrumentalista es un credo expuesto a ser utilizado con ánimo defensivo, en un intento de *escapar a las refutaciones.* Porque un instrumento no aspira a la verdad y, por tanto, no puede ser falsado, en el sentido en el que una teoría que tiene esas aspiraciones, puede ser falsada.

Así, el instrumentalismo no hace más que resucitar una filosofía de antigüedad considerable. Pero los instrumentalistas modernos, claro, no se percatan de que están filosofando. En consecuencia, ni siquiera se percatan de la posibilidad de que su moderna filosofía pue-

---

[9] En una carta con fecha del 7 de noviembre de 1944, citada por M. Born en su *Natural Philosophy of Cause and Chance,* 1949, p. 122.

[10] *Cf.* mi artículo «Three Views Concerning Human Knowledge», en *Contemporary British Philosophy* 3, editado por H. D. Lewis, 1956. Véase también mi «A Note on Berkeley as a Precursor of Mach», *Brit. Journ. Phil. Science,* 4, 1953, pp. 26 y ss. [Ambos artículos han sido reimpresos en *El desarrollo del conocimiento científico* (C. & R., 1963). *Ed.*].

da ser, en realidad, acrítica, irracional y censurable —como yo estoy convencido de que es.

No tengo la intención, no obstante, de tratar sobre la teoría cuántica o el cisma en física a la luz del problema de realismo contra instrumentalismo. Primero, ya he tratado de ese aspecto en otro lugar. Segundo, quiero tratar el problema bajo un aspecto diferente: el de una teoría de la probabilidad. Estos dos aspectos están, naturalmente, relacionados. La preocupación por una intepretación física, al contrario que el andar a vueltas con las fórmulas, lleva a atacar el problema de una interpretación objetiva, incluso física, de la probabilidad.

Para que no se me interprete mal, debo dejar claro lo que *no* quiero decir con comprensión física y con interpretación física. No me refiero, de ningún modo, a la construcción de modelos y, menos aún, a la construcción de modelos en términos de una teoría ya descartada y sustituida (como, por ejemplo, modelos mecánicos). Tampoco me refiero a operar con imágenes o metáforas que puedan darnos una sensación de familiaridad o facilidad. Debemos recordar que las *fuerzas* no fueron fácilmente intuidas por Newton y sus contemporáneos, y que durante mucho tiempo, los físicos encontraron los *campos* de fuerzas de Faraday y Maxwell muy difíciles de entender. No es la facilidad intuitiva lo que persigo, sino un punto de vista que sea lo suficientemente definido como para que pueda aclarar algunas dificultades y *ser criticado en términos racionales.* (La complementariedad de Bohr no puede ser criticada de ese modo, me temo: sólo puede ser aceptada o *denunciada* —quizá por ser *ad hoc* o por ser irracional o por ser irremediablemente vaga [11].)

No tiene mucho sentido, sin embargo, tratar de explicar, en términos abstractos, lo que quiero decir con una interpretación física de la teoría cuántica; porque he ofrecido una en *L.I.C.* (capítulo IX) —una que podía ser criticada y lo ha sido— y ahora voy a ofrecer una diferente, en términos de la teoría propensivista de la probabilidad. Es una interpretación que no es *ad hoc,* porque es aplicable a las tiradas de monedas y a la estadística clásica tanto como a la teoría cuántica. Y también puede ser criticada. Espero que lo sea.

3. PROBABILIDADES SUBJETIVAS, PROBABILIDADES ESTADISTICAS Y DETERMINISMO

Cuando estaba escribiendo *La lógica de la investigación científica,* no me percaté de la posibilidad de una interpretación propensivis-

[11] Einstein se refirió a él como «el principio de complementariedad de Bohr, cuya formulación exacta... he sido incapaz de lograr, a pesar del mucho esfuerzo que le he

ta: creí, no sin buenas razones, que la única interpretación aceptable de la probabilidad en física era la «*interpretación frecuencial*» o la «*interpretación estadística*», del tipo propuesto por Venn o por von Mises; y en todo este *Post Scriptum* he seguido usando los términos «estadística» e «interpretaciones estadísticas» en este sentido. Desde el punto de vista de la interpretación estadística, debe decirse que los enunciados de probabilidades *singulares* son *singulares sólo en la forma* (o «formalmente singulares»: *cf. L.I.C.*, sección 71), en realidad, deben interpretarse con ayuda de *enunciados estadísticos* sobre poblaciones o colectivos de cierto tipo [12].

Siempre comprendí, naturalmente, que muchos físicos (Boltzmann, Einstein y, especialmente, los teóricos cuánticos), incluso cuando hablaban de «estadística» normalmente estaban usando enunciados de probabilidades *singulares;* pero creí que ese hecho confirmaba mi análisis en la medida en que esos enunciados debían interpretarse como simplemente «formalmente singulares».

Pienso ahora que estaba equivocado, y que al usar enunciados de probabilidades singulares, al menos algunos de esos físicos, buscaban a tientas, más o menos conscientemente, un tipo de interpretación propensivista. Pero entre ellos, los que eran intuitivamente deterministas, no pudieron ver con claridad la interpretación propensivista a causa de su creencia determinista; porque, como he argüido [13], las propensiones pueden aceptarse como realidades físicas (análogas a fuerzas) sólo cuando se ha renunciado al determinismo.

También estaba equivocado en otra cosa: no vi con la suficiente claridad que, cuando Max Born introdujo su «interpretación estadística» de la teoría cuántica, usó enunciados de probabilidades singulares que, aunque podían interpretarse como «formalmente singulares», él las *concebía como seriamente singulares* —es decir, como enunciados de probabilidades singulares subjetivas, como enunciados sobre nuestra ignorancia. Como yo nunca fui determinista (aunque siempre supe que las teorías de un tipo que ahora llamo «determinista *prima facie*» pueden ser muy informativas y muy contrastables), no acababa de ver lo seriamente tentado que estaba un determinista —e incluso un exdeterminista— a interpretar subjetivamente (o lógicamente) todos los enunciados de probabilidades; es decir, como *enunciados de nuestra parcial ignorancia.* No comprendía que podía, no obs-

---

dedicado». (P. A. Schilpp, *op. cit.*, p. 674.) La teoría de que Einstein no era suficientemente inteligente para entender este principio o que era demasiado anticuado («antediluviano» y «retrógrado» son los modernos y progresistas términos que se le aplicaban a Einstein) me parece un poco *ad hoc.*

[12] [Véase la discusión de Popper de la probabilidad en el tomo I Parte 2 de este *Post Scriptum. Ed.*].

[13] [Véase *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo* (O. U.), tomo II de este Post Scriptum, secciones 27-30. *Ed.*].

tante, llamarlos «estadísticos» porque él creía que podía derivar (o «casi deducir») sus conclusiones estadísticas a partir de esos enunciados de probabilidades singulares, a la manera de Bernoulli.

Yo sabía que esas derivaciones eran palpablemente inválidas, como lo expliqué en *L.I.C.*, sección 62. Al principio me reduje a reinterpretar esos casos en el sentido estadístico sin intentar con suficiente empeño comprender los motivos que se encierran tras una interpretación subjetiva de la probabilidad. Me di por satisfecho con señalar, repetidamente, que no podía derivarse ningún enunciado estadístico objetivo de una teoría subjetiva de la ignorancia (la de Jeffreys, por ejemplo, o la de Keynes).

Hoy comprendo por qué tantos deterministas, e incluso exdeterministas, que creen en el carácter determinista de la física clásica, creen seriamente en una interpretación subjetivista de la probabilidad: es, de algún modo, *la única posibilidad razonable* que pueden aceptar; porque las probabilidades físicas objetivas son incompatibles con el determinismo; y, si la física clásica es determinista, tiene que ser incompatible con una interpretación objetiva de la mecánica estadística clásica.

(Puedo descuidar aquí la otra posibilidad, mencionada por Landé en el pasaje citado en *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo,* sección 29: la de usar la hipótesis objetiva del caos molecular. Porque cuando se comprende que eso supone una armonía preestablecida —que mantiene constantes las probabilidades de caras y cruces— o, alternativamente, un tipo de principio teleológico —que explica el efecto de los procesos de mezcla— es improbable que nadie la contemple.)

La interpretación subjetiva de la probabilidad parece funcionar siempre que uno no vea que no es válido el «puente» que lleva de ella a las frecuencias objetivas. Este puente, naturalmente, es la ley de los grandes números, o la ley fuerte de los grandes números. Pero esas leyes no pueden derivarse en la teoría subjetiva porque su derivación se basa en una suposición de independencia que (como vio Keynes) contradice la interpretación subjetiva [14].

Y, efectivamente, es claramente absurdo creer que los peniques caen o las moléculas entran en colisión de manera aleatoria *porque nosotros no conocemos* las condiciones iniciales, y que actuarían de modo diferente si algún demonio nos revelase su secreto: no es sólo imposible, es absurdo explicar las frecuencias estadísticas objetivas por medio de la ignorancia subjetiva.

El absurdo se hace notar a veces; cuando eso ocurre, el físico, por regla general, adopta una concepción objetiva. En consecuencia, ob-

[14] Véanse las discusiones en *Realismo y el objetivo de la ciencia [R. & A. of Sc.],* tomo I de este *Post Scriptum,* parte 2, secciones 2, 4 y 7.

servamos una oscilación característica, un titubeo por parte de muchos físicos, entre las interpretaciones objetivista y subjetivista. A causa de ese titubeo, pierden su sensibilidad hacia estas cuestiones (que, de todos modos, se consideran filosóficas); y encontramos osadas afirmaciones pertenecientes a la teoría objetiva al lado de afirmaciones igualmente osadas de subjetivismo —a veces, incluso, en la misma página.

Esta actitud de titubeo sistemático —es decir, el intento sistemático de querer una cosa y la contraria— se encuentra en la interpretación de Copenhague. Pero antes de volver a la teoría cuántica, discutiré brevemente la situación en la mecánica estadística clásica.

4. LA OBJETIVIDAD DE LA MECANICA ESTADISTICA

La mecánica estadística proporciona muchos ejemplos sorprendentes de cómo los enunciados de probabilidades, que debieran interpretarse objetivamente (o bien de un modo puramente estadístico, o bien en el sentido de la interpretación propensivista), se malinterpretan a menudo en el sentido de una teoría subjetiva de nuestra ignorancia.

Consideremos una gran campana de vacío, vaciada, en la que ponemos un frasco pequeño de medicamentos lleno de aire. Luego destapamos el frasco. Todos sabemos lo que pasará —objetivamente— en cada caso: el aire se escapará del frasco y enseguida se distribuirá uniformemente por toda la campana.

También sabemos que aunque esperemos mucho tiempo, nunca encontraremos un ejemplo del proceso inverso: el aire no volverá espontáneamente al frasco. Nos encontramos ante un proceso irreversible.

Este sencillo hecho ha dado lugar a discusiones interminables, principalmente porque *no* es físicamente imposible, naturalmente, que el aire vuelva. Si una molécula se mueve en una dirección, tiene que ser físicamente posible para ella moverse también en la dirección contraria; y si la dirección de los movimientos de todas las moléculas se invierte, entonces, todas se retirarán al frasco.

Como no puede dudarse la posibilidad física de este suceso, explicamos el hecho experimental de que el proceso sea irreversible por la extrema *improbabilidad* de un regreso espontáneo al frasco. Y como el hecho a explicar —la irreversibilidad del proceso— es un hecho experimental objetivo, las probabilidades e improbabilidades en cuestión deben ser también objetivas.

Una explicación probabilista objetiva de los procesos irreversibles del tipo descrito fue claramente esbozada por Planck. Planck indicó que «la abrumadora mayoría de los casos», o más exactamente, de todos los *estados iniciales* posibles (donde cada «estado inicial» com-

prende todas las moléculas) era tal que «los sucesos resultantes de ellos concuerdan completamente en su valor medio (aunque no en todos sus detalles), mientras que aquellos casos que llevan a desviaciones perceptibles [de los mencionados valores medios] ocurren sólo... en números decrecientes, porque sólo ocurren si ciertas... condiciones muy especiales obtienen... condiciones que se relacionan con la posición y velocidad de las moléculas de modos muy especiales...» [15]. Es decir, las muy especiales condiciones iniciales que producirían desviaciones perceptibles de la conducta normal tienen una probabilidad decreciente.

El método por el que podemos mostrar que la medida del conjunto de estados iniciales que produce estados normales es igual a uno, y que la medida de estados iniciales que produce estados anormales es igual a cero, es fundamentalmente idéntico al contemplado por Bernouilli: de la misma manera que podemos deducir de la supuesta equiprobabilidad (igual medida de posibilidad) de caras (0) y de cruces (1) y de la independencia de las tiradas individuales, la estabilidad de las medias de casi todas las sucesiones suficientemente largas (las medias se aproximarán mucho a 1/2), igual podemos deducir, a partir de supuestos simples relativos a la equiprobabilidad de los estados posibles, que casi todos los estados «concordarán completamente en sus valores medios» en palabras de Planck, es decir, que tienen medias estables con respecto a la distribución de las posiciones y velocidades de las moléculas.

Podemos atribuir la etiqueta de «normal» o «aproximadamente en equilibrio» a cualquier estado para el cual las posiciones y las velocidades (momentos) de las moléculas estén distribuidas de tal modo que no haya fluctuaciones macroscópicas; o, más exactamente, que sus medias sobre cualquier subvolumen pequeño pero macroscópico no difieran apreciablemente de su media sobre el volumen total. Puede entonces mostrarse que la medida del conjunto de los estados normales se acerca a 1; y la de los estados anormales a 0. Además, como la medida no varía si, debido a los movimientos de las partículas, los diversos estados que pertenecen a ella se transforman en estados diferentes, encontramos que casi todos los estados deben ser tales que, como consecuencia de esos movimientos, vuelvan a transformarse en estados normales (de modo que las medias de los tiempos de casi todos los estados sean normales de nuevo [16]). Naturalmente, habrá fluctuaciones pero serán demasiado escasas y demasiado breves como para afectar las medias de los tiempos (excepto para un conjunto de medida cero).

---

[15] Véase M. Planck, *Theorie der Wärmestrahlung*, 5.ª ed., 1923, § 116, pp. 114 y ss.

[16] *Cf.* E. Hopf, *Ergodentheorie*, en *Ergebnisse der Mathematik*, Springer, 1936.

De este modo, vemos que hay una probabilidad, que no se diferencia de cero, de encontrar un frasco pequeño del que el aire no se escape si se le destapa en un gran vacío; y viceversa, existe una probabilidad cero de encontrar un caso en el que las moléculas se retiren al interior del frasco pequeño espontáneamente.

Todas estas consideraciones operan, naturalmente, con una teoría de la probabilidad (frecuencial o propensivista) estrictamente objetiva: son tan objetivas como el proceso irreversible que tratan de explicar y son válidas independientemente de cuál sea nuestro propio estado de conocimiento o ignorancia respecto a las condiciones iniciales reales y detalladas de las moléculas implicadas. Dicho de un modo más explícito: son válidas tanto si somos ignorantes, como, de hecho, somos siempre, de las condiciones iniciales de todas las moléculas, como si un demonio nos proporciona información completa sobre todas esas condiciones iniciales y, así, sobre el estado preciso del gas.

5. LA INTERPRETACION SUBJETIVISTA DE LA MECANICA ESTADISTICA

Esta no es, sin embargo, la concepción usual de la cuestión. Como indiqué en la sección 3, muchos físicos —entre ellos algunos de los más famosos— tratan de explicar estas cuestiones en términos de una teoría subjetiva de la probabilidad. Afirman que la irreversibilidad es una consecuencia de nuestra ignorancia de los detalles del estado del gas [17].

Interpretan la tendencia o propensión del sistema a incrementar su *desorden* (o «entropía») —una tendencia que la teoría estadística trata de explicar siguiendo la línea de Bernoulli— como una tendencia de nuestra *ignorancia* a aumentar. Es decir, en lugar de interpretar la «entropía» de un sistema como una medida de su estado objetivo de desorden o aleatoriedad, la interpretan como una medida de nuestro propio estado subjetivo de ignorancia del sistema. Esta interpretación lleva a la absurda conclusión de que las moléculas escapan del frasco porque no lo sabemos todo sobre ellas y porque nuestra ignorancia está destinada a crecer, a menos que nuestro conocimiento sea perfecto desde el principio.

Creo que esto es un absurdo palpable y que el aire caliente continuará escapando aunque no haya nadie en el patio para proporcionar la nesciencia necesaria.

---

[17] [Véase también la sección 36 de la autobiografía intelectual de Popper, en P. A. Schilpp, ed., *The Philosophy of Karl Popper*, 1974, y en *Búsqueda sin término (U. Q.,* 1976). *Ed.*].

Estas absurdas concepciones están implícitas, no obstante, en las teorías de algunos famosos físicos que han hecho contribuciones muy importantes a la teoría cuántica. Citaré primero un pasaje de un análisis crítico de la condición de la probabilidad; la cita está tomada de un artículo sobre la probabilidad y la física de W. Pauli [18]. Dice: «La primera aplicación de la probabilidad en física —fundamental para nuestra comprensión de las leyes naturales— fue la teoría estadística general del calor, creada por Boltzmann y Gibbs. Como es bien sabido, llevó por necesidad a la interpretación de la entropía de un sistema como una característica de su estado que (al contrario que la energía) depende de nuestro *conocimiento* del sistema.»

Sin dejar lugar a dudas sobre su subjetivismo, Pauli continúa: «Si ese conocimiento nuestro es máximo —es decir, el conocimiento más preciso que es compatible con las leyes de la naturaleza... entonces la entropía es siempre cero. Los conceptos termodinámicos, sin embargo, sólo son aplicables a un sistema si nuestro conocimiento de su estado inicial es inexacto...»

Pauli no se da cuenta, claramente, de que su interpretación subjetivista es hija del determinismo. Por el contrario, después de haberse acostumbrado a la interpretación subjetivista en el campo de la teoría cuántica, que es no-determinista, considera necesario mencionar que la interpretación subjetivista no contradice al determinismo:

«La aplicación del concepto de probabilidad en física que acabamos de describir —continúa Pauli—, aunque era fundamental, era lógicamente compatible con una forma determinista de las leyes de la naturaleza.» La observación sobre la compatibilidad es correcta, pero las palabras «*aunque era fundamental*» descubren la falta de apreciación del hecho de que la interpretación subjetiva fue adoptada (sobre todo por Laplace) *porque* era lógicamente compatible con el determinismo y porque era, aparentemente, la *única* compatible; las palabras de Pauli sugieren incluso que la interpretación subjetiva era una especie de anticipación de ese modo de pensar supuestamente más «fundamental» que debemos a la teoría cuántica y a la complementariedad. (En efecto lo era, pero en otro sentido totalmente distinto.) En la oración siguiente, Pauli menciona las tendencias a interpretar el concepto subjetivo de probabilidad como un concepto irreducible o «primario» de la física. Y termina el párrafo con una referencia a lo que él llama «el hecho de que las inferencias inductivas de las ciencias naturales son siempre inferencias de probabilidades».

La interpretación subjetiva de Pauli requiere, naturalmente, un «puente» con cuya ayuda podamos decir algo objetivo. Su «puente»

[18] *Cf.* W. Pauli, «Wahrscheinlichkeit und Physik», *Dialectica* 8, 1954, pp. 112-124. La cita es de la pp. 114 y ss.

es, al parecer, «la ley fuerte de los grandes números» de Cantelli [19]. Creo que sería justo traducir esta ley a un lenguaje subjetivista como sigue: «Supongamos que *nuestro grado de nesciencia* sobre el resultado de un experimento permanece constante durante toda una larga sucesión de repeticiones de ese experimento; y supongamos que ese grado de nesciencia es igual a p. (Puede ser nesciencia máxima, normalmente expresada por $p = 1/2$.) Bajo este supuesto de *no*-saber, siempre podemos calcular un gran número N que tenga la siguiente propiedad: para cualquier grado deseado de certidumbre, excepto certidumbre absoluta, podemos *saber con certeza* que las frecuencias relativas de los resultados de los experimentos se desviarán de nuestro grado original de nesciencia p desde el enésimo experimento en adelante, tan poco como queramos.

Esta formulación muestra, espero, lo absurdo que es creer que podemos derivar grados altos de certidumbre a partir de la nesciencia y que es extraño sugerir que una frecuencia debe ser igual a un grado de nesciencia. *(Cf. L.I.C.,* sección 62.) Naturalmente, mi formulación difiere de la usual, que evita, en casos como éste, el uso de un lenguaje explícitamente subjetivista; y ahí se originan todas las oscilaciones entre las interpretaciones objetiva y subjetiva.

Entre las afirmaciones de Pauli que se han citado aquí, la que tiene mayor interés para nosotros es ésta: «Si ese conocimiento nuestro es máximo —es decir, el más preciso que es compatible con las leyes de la naturaleza...—, entonces la entropía es siempre cero.» Esta afirmación no parece haber sido disputada. La encontramos, por ejemplo, en el famoso libro de J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1955) [20]: «Para un observador clásico, que conoce todas las coordenadas y los momentos, la entropía es, por tanto, constante, y es, de hecho, cero, puesto que la "probabilidad termodinámica" de Boltzmann es 1...»

No examinaré aquí los argumentos en apoyo de esta tesis, porque me parecen innecesariamente complicados, muy embrollados, enormemente arbitrarios y algo apologéticos. En cambio, trataré de contrastar esta tesis con la concepción que yo considero correcta (que creo que era de Boltzmann), y luego la refutaré mostrando lo absurdo de sus consecuencias.

Lo que yo creo que es la concepción correcta de la entropía cero y la entropía máxima es esto: un sistema estará en un estado de máxi-

---

[19] *Op. cit.*, pp. 113 y ss. (Pauli formuló la ley de Cantelli en lenguaje objetivista y se refirió a ella como «el teorema de Bernoulli, también llamado ley de los grandes números»).

[20] Traducido de la edición alemana al inglés por R. T. Beyer; la cita es de la p. 400. Von Neumann se refiere al artículo de L. Szilard en *Zeitschrift für Physik*, 53, 1929. Véase también *L.I.C.*, apéndice *iv [véase también *Búsqueda sin término*, sección 36 (U. Q., 1976). *Ed.*].

ma entropía si, y sólo si, las distancias entre las moléculas (y, por tanto, sus posiciones) muestran una distribución fortuita o «normal» cuya media es igual a una distancia en la que las moléculas están igualmente espaciadas por todo el volumen disponible, y si, además, las velocidades (y sus direcciones) están distribuidas de acuerdo con una distribución fortuita, descrita por la ley de la distribución de la velocidad de Maxwell. Dicho de otro modo, la entropía de un sistema es máxima si, y sólo si, las posiciones y las velocidades de las moléculas están distribuidas de forma aleatoria.

Si el sistema consta de muchísimas moléculas, esto entraña que, para todos sus subvolúmenes, las posiciones y velocidades estarán también distribuidas de forma aleatoria.

Por el contrario, el sistema estará en un estado de *entropía cero* si, y sólo si, está todo lo alejado de un estado aleatorio como es posible. El tipo de estado contemplado sería un estado en que todas o casi todas las moléculas estuvieran apiñadas en un pequeño subvolumen y en el que todas o casi todas tuvieran la misma velocidad (y dirección).

De este modo, los dos estados de entropía extrema pueden describirse objetivamente.

La descripción es exactamente análoga a la descripción de una sucesión aleatoria de ceros (caras) y unos (cruces), con equidistribución. Sea N la longitud de una sucesión S muy larga y sea n el máximo número entero tal que 2^{n+1} sea menor que N. Podemos entonces llamar a la sucesión S «*perfectamente aleatoria*» si, y sólo si, el número relativo de las ocurrencias de cualquier par, triplo..., n-tuplo de ceros y unos no se desvía de cualquier otro par, triplo..., n-tuplo más de $d = n/N$ (*Cf. L.I.C.*, final de la sección 55, notas *2 y 1).

Habiendo definido de este modo la aleatoriedad máxima en el caso de una sucesión —correspondiente a su máxima entropía— podemos, naturalmente, construir fácilmente una sucesión en la que la diferencia d entre las frecuencias de ciertos pares, triplos... n-tuplos, alcance un máximo. Esto ocurrirá, por ejemplo, si todos los unos de una sucesión S equidistribuida se apiñan en un bloque precedido y seguido de, digamos, sendos bloques de ceros.

La analogía con el estado de un gas es obvia. Así, he mostrado que podemos caracterizar la aleatoriedad o entropía en términos objetivos.

Hasta ahora no he mencionado la probabilidad. La probabilidad puede entrar en juego ahora, sin embargo, para decirnos que la inmensa mayoría de todas las sucesiones posibles —o de todos los estados posibles de un gas— será altamente aleatoria o entrópica. Dicho de otro modo, si disponemos un experimento apropiado para producir una sucesión de ceros y unos, o un estado de un gas, entonces, por regla general, habrá una propensión muy elevada a producir su-

cesiones aleatorias, y gases de entropía aproximadamente máxima. Esta tendencia o propensión no se hará operativa, sin embargo, si nuestra disposición experimental implica un modo especial de ordenar: por ejemplo, si implica un método de producir el resultado «010101...».

La inmensa mayoría de todos los experimentos restantes tendrá una tendencia o propensión a producir estados aleatorios; y, en consecuencia, la inmensa mayoría de todos los estados, sean aleatorios o no, tendrán, del mismo modo, la tendencia a ser sucedidos por estados aleatorios.

Hay que observar que este análisis de estados aleatorios y de sucesiones aleatorias está vinculado a la ley de los grandes números y sólo es aplicable, por tanto, a los estados de los gases que constan de un elevado número de moléculas, o a sucesiones muy largas. La cuestión de si una sucesión que conste de uno o dos elementos es ordenada o desordenada no tiene sentido [21].

Sobre la base de este análisis, puede mostrarse cómo ha surgido la creencia errónea de que el *conocimiento completo* del estado de un gas le daría una entropía cero. El error está relacionado con el hecho de que podemos partir del supuesto de que todo posible estado singular de un gas —o toda posible sucesión singular— es igualmente probable y que todo estado o sucesión singular tiene, por tanto, que tener una *probabilidad* cero (o aproximadamente cero). Esto es correcto. También es correcto suponer que las probabilidades altas están, de algún modo, estrechamente asociadas con una entr[illegible]ía alta, y las probabilidades cero con una entropía cero. De esas dos premisas correctas se infiere, entonces, que todo estado singular —si está totalmente dado— y toda sucesión singular tienen una *entropía* cero.

Pero la inferencia no es válida, porque la estrecha asociación entre probabilidad y entropía no es tan estrecha como todo eso. Es un hecho que todo estado o toda sucesión completamente dada es igualmente probable y, por tanto, enormemente improbable, pero ese hecho, simplemente, no nos concierne aquí, cuando estamos preocupados esencialmente por encontrar un método para *distinguir* los distintos estados o sucesiones según su estructura interna, en lugar de por un método que los considere *indistinguibles* con respecto a su probabilidad.

El error puede describirse también así: estamos interesados en las *propiedades estructurales* de las sucesiones —en la cuestión de si una cierta sucesión tiene la *propiedad estructural* del desorden (u orden)—.

[21] El problema de von Neumann de aplicar las ideas de Boltzmann al estado de un gas que constase de una sola molécula parece mal concebido. Su solución subjetivista —que la entropía de una sola molécula dependerá de nuestro estado de conocimiento— se mantiene y cae con su teoría subjetiva [véase *Búsqueda sin término (U. Q.*, 1976), sección 36. *Ed.*].

Aunque cada sucesión en sí es igualmente improbable, es muy probable que tenga la propiedad del desorden antes que la del orden. Hay muchas más sucesiones desordenadas que sucesiones ordenadas.

(O, por usar un ejemplo análogo, podemos decir que cualquier ocurrencia determinada —por ejemplo, que hayamos tirado una moneda aquí y ahora— es infinitamente improbable. Pero eso no significa que la propiedad «caras» de la tirada sea infinitamente improbable.)

La creencia de que cualquier estado o sucesión determinada tiene una entropía cero es tan obviamente equivocada que casi nunca se ha sostenido de esta forma tan tajante. Pero, como hemos visto, se ha usado en la versión subjetivista. De esta forma, era más plausible, porque podía argüirse que el conocimiento incompleto podía corresponder a todo un conjunto de estados posibles (cuya medida podía ser no-cero), mientras que el conocimiento completo correspondería a un solo estado posible cuya probabilidad sería cero [22].

Volvamos ahora a nuestro frasco de medicamento lleno de aire; y supongamos que esta vez nuestro conocimiento sobre su microestado es máximo —«es decir, el conocimiento más exacto que es compatible con las leyes de la naturaleza». Entonces, la entropía del sistema tiene que ser cero, nos dicen Pauli y von Neumann.

Sin embargo, desde el punto de vista objetivo, el sistema está (muy probablemente) en un estado de desorden y aleatoriedad: su entropía es máxima.

¿Quién tiene la razón? Desde el punto de vista objetivista podemos averiguarlo fácilmente. Porque, estando en posesión, según nuestro supuesto, de un conocimiento perfecto, sólo necesitamos calcular las distribuciones de las posiciones y las velocidades y ver si son aleatorias o aproximadamente aleatorias. Podemos estar bastante seguros, a priori, de que no descubriremos que el sistema está en un estado perfectamente ordenado. En el caso, altamente improbable, de que el sistema esté en un estado perfectamente ordenado, el objetivista admitirá que está equivocado en eso; pero seguirá insistiendo en que es un accidente altamente improbable que no tiene nada que ver, absolutamente, con el hecho de que estuviéramos en posesión de un conocimiento perfecto sobre el sistema. Además, el objetivista afirmará que incluso en el caso extremadamente improbable de que hayamos encontrado al sistema accidentalmente en un estado ordenado, pode-

[22] Hay otra dificultad más, muy real, que ha contribuido a hacer más aceptable la interpretación subjetivista de la entropía. Estoy pensando en el problema del demonio de Maxwell: desde 1905, el éxito del exorcismo del demonio se ha vuelto dudoso y este hecho ha llevado a intentos de resolver el problema invocando probabilidades subjetivas y otras medidas del conocimiento (o «información») subjetivo. Sin duda, se han desenterrado algunas analogías interesantes, pero la solidez del edificio y, en especial, la parte representada por el demonio de Maxwell, me parecen muy cuestionables.

mos estar muy seguros de que estaba desordenado en el momento anterior y de que en el instante siguiente volverá a un estado de desorden; y puede contrastar su retrodicción y su predicción con un cálculo de uno de los estados siguientes del sistema; cálculo que, puesto que posee un conocimiento perfecto, será capaz de realizar.

Todo este razonamiento, creo, concuerda con el de Boltzmann, que arguyó que el sistema alcanza una y otra vez estados de orden (baja entropía), pero muy poco frecuentemente, y sólo durante períodos de tiempo extremadamente cortos, que son proporcionales a la improbabilidad del estado de orden, y que decrecen muy rápidamente con un aumento en el grado de orden.

Oigamos ahora al subjetivista. Para él, este razonamiento no significaría nada. Ha sustituido el término «orden» por el término «conocimiento» y el término «desorden» por el de «nesciencia». Y quizá señale que hay una ley que dice que la nesciencia parcial aumentará rápidamente y pronto se convertirá en nesciencia total debido a las colisiones entre las moléculas. Como señala Max Born, es suficiente que *no* sepamos la posición o el momento de una molécula singular: bajo este supuesto, nuestra ignorancia se extenderá pronto a todo el sistema, incluso aunque conozcamos, al principio, las posiciones y los momentos precisos de *todas* las demás moléculas. «La irreversibilidad —escribe Born— es, por tanto, una consecuencia de la introducción explícita de la ignorancia dentro de las leyes fundamentales» [23].

Este incremento de la nesciencia muestra una cierta similaridad con el incremento del desorden de Boltzmann; pero es suficientemente diferente como para distinguirlo claramente.

El punto fundamental es que la nesciencia aumente *siempre,* a condición de que no partamos de un conocimiento completo. Pero el desorden, o la entropía, *decrece a veces;* según Boltzmann, fluctúa. Y tenemos evidencia experimental de esas «fluctuaciones» en el llamado movimiento browniano desde la interpretación de Einstein de 1905. Así pues, no parece posible mantener la identificación subjetivista de desorden (o entropía) y nesciencia.

En segundo lugar, la nesciencia *no* aumenta si partimos de un conocimiento perfecto o completo (como indican tanto Von Neumann como Born); porque el conocimiento perfecto nos permite calcular todos los estados futuros con absoluta precisión. Una vez más, esto es incompatible con la concepción de Boltzmann; porque si un sistema pudiera alcanzar alguna vez perfecto orden por medio de una fluctuación altamente improbable, volvería, con toda probabilidad, a desordenarse inmediatamente, según Boltzmann.

Así, hay que descartar la tan repetida pretensión de que podemos

[23] Max Born, *Natural Philosophy of Cause and Chance,* 1949, p. 72. Pueden encontrarse otros pasajes de un carácter igualmente subjetivista en las pp. 48 y 59.

traducir, por así decirlo, la teoría de Boltzmann a un lenguaje subjetivo.

Después de tratar de explicar lo que yo considero la concepción correcta, me ocuparé ahora, como había prometido, de refutar la teoría subjetivista de la entropía o el desorden. Intentaré mostrar muy brevemente que la teoría es absurda.

Abramos de nuevo nuestro frasco de medicamentos en la campana de vacío. Lo que queremos explicar es por qué el gas escapará siempre, y por qué escapa de modo irreversible. Tanto los objetivistas como los subjetivistas lo explican como una consecuencia de la ley según la cual la entropía, o desorden, tiende a aumentar. El objetivista señalará que en el volumen de que se dispone ahora, las posiciones de las moléculas estarían muy ordenadas si el gas se quedase en el frasco, y que habrá una probabilidad enorme, en el sentido de una propensión enorme, de que el gas adopte un estado en el que las posiciones de las moléculas se distribuyan de un modo aleatorio por todo el espacio disponible. Así, el objetivista puede ofrecer una explicación (no importa si es enteramente adecuada) de por qué escapa el gas.

El subjetivista, sin embargo, no puede ofrecer ninguna explicación de esa índole. Ni siquiera puede decir que el gas se ha expandido de hecho. *Todo lo que puede decir es que su ignorancia ha aumentado.* (Siempre que no hubiese partido de un conocimiento perfecto.) Esto es absurdo. Porque lo que queríamos explicar no era el estado de ignorancia, sino el estado del gas; no que se haya perdido conocimiento, sino que el gas se ha salido del frasco del medicamento.

«Las variaciones temporales de la entropía», resume von Neumann, «están basadas, pues, en el hecho de que el observador no lo sabe todo». Así, si el observador conociera perfectamente el contenido de nuestro frasco, la entropía no aumentaría. Habría dos posibilidades: 1) que el gas se quedase en el frasco, y 2) que el gas se escapase. 1) Es claramente absurdo (supondría una influencia mística de nuestro conocimiento sobre el estado del gas). Pero si 2), el gas se escapa, su escape no puede relacionarse con un aumento de la entropía. En efecto, nuestro conocimiento perfecto nos permitiría predecir el escape *sin recurrir* a la ley del incremento de la entropía: podríamos predecir el escape calculando las trayectorias de todas las moléculas. Pero, a pesar del hecho de que no necesitamos recurrir a la ley de la entropía, es absurdo negar que el escape ocurre de acuerdo con ella: el gas ha escapado, aunque, en este caso particular, el conocimiento no ha escapado con él. Y fue el escape del gas lo que se describió, en un principio, como un aumento de la entropía.

Desde un punto de vista determinista, es difícil ver, desde luego, para qué sirve la mecánica estadística: por qué, si se han resuelto todas las cuestiones de predicción del escape de los gases de cada uno de los frascos con condiciones iniciales dadas, tiene que quedar una

cuestión: me refiero a la cuestión del *carácter legiforme* de la *regularidad* de los escapes de gas o de los procesos de mezcla y la cuestión de la irreversibilidad de esos procesos. Esas regularidades podrían permanecer inadvertidas, incluso aunque pudiéramos predecir exactamente, en cada caso individual, lo que iba a ocurrir.

Mientras yo veo en la mecánica estadística un intento de explicar esas regularidades, von Neumann describe [24] el tratamiento estadístico como «un lujo de añadidura suplementaria» que sólo es importante *en el caso de que nuestro conocimiento sea deficiente.* En esta actitud está el origen de todo el problema: la teoría subjetiva se muestra nuevamente como un residuo de un prejuicio determinista.

6. OSCILACIONES ENTRE LAS DOS INTERPRETACIONES

Ya se ha señalado que Pauli oscila entre las dos interpretaciones: interpreta la ley fuerte de Cantelli en un sentido objetivista. Pero también oscilan las interpretaciones de von Neumann y Born. Así, encontramos en el libro de von Neumann [25] un pasaje en el que la teoría de los «colectivos» de von Mises se describe como «necesaria, en general, para establecer la teoría de la probabilidad como una teoría de las frecuencias»; y se da a entender que el autor acepta esa teoría. Pero las concepciones de von Mises son totalmente incompatibles con cualquier teoría subjetiva, como siempre recalcó von Mises; y von Neumann no hace el menor intento de explicarnos cómo es posible que puedan combinarse las dos concepciones.

Lo mismo ocurre con Max Born. He aludido a su subjetivismo; pero también hay pasajes objetivistas en la obra de Born. «La irreversibilidad sólo puede entenderse si se exime explícitamente a parte del sistema de la causalidad», es un pasaje de este tipo [26]. (Me siento inclinado a convenir con el espíritu del pasaje, aunque no estoy de acuerdo con la fraseología.) En la continuación de ese pasaje, las vacilaciones de Born parecen implícitas. «Hay que abandonar la condición», escribe, «... de que las posiciones y las velocidades de las partículas están bajo control...» El término «bajo control», que no está explicado, me parece indicar una vacilación entre «no son conocidas» —lo que concordaría con la mayor parte de su texto— y «no pueden reproducirse a voluntad, si reproducimos el experimento» o, dicho de otro modo, «no son parte de (o quizá, «no pueden hacerse parte de») las condiciones objetivas del experimento» —lo que indicaría una inclinación hacia una interpretación objetiva.

---

[24] Von Neumann, *op. cit.*, p. 298.
[25] Von Neumann, *op. cit.*, p. 206.
[26] M. Born, *op. cit.*, p. 72.

Tanto vacilar y oscilar es, desde luego, una consecuencia necesaria de cualquier concesión al subjetivismo. Porque yo no creo en absoluto que los autores citados *pretendiesen* realmente explicar procesos físicos irreversibles, tales como la mezcla, la difusión, recurriendo a nuestra ignorancia. Supongo que, puestos ante estas consecuencias, hubieran retirado las afirmaciones citadas o, al menos, hubieran tratado de reinterpretarlas. Pero estoy seguro de que adoptaron esas posiciones porque fueron empujados a ello por las dificultades, muy reales, inherentes a su enfoque fundamental.

CAPITULO II

LA OBJETIVIDAD DE LA TEORIA CUANTICA

7. LA OBJETIVIDAD DE LA TEORIA CUANTICA: LAS CAJAS

Se afirma con frecuencia que, en vista de la situación en la teoría cuántica, el objeto y el sujeto no pueden ya separarse claramente [1]. Dicho con palabras de Heitler, la «división del mundo en una ''realidad exterior objetiva'' y ''nosotros'', tímidos espectadores, no puede mantenerse por más tiempo. El objeto y el sujeto se han hecho inseparables el uno del otro» [2]. Esto, según Bohr, se debe a «*la imposibilidad de una separación clara entre la conducta de los objetos atómicos y la interacción con los instrumentos de medir que sirven para definir las condiciones bajo las cuales aparecen los fenómenos*» [3]. Heitler elabora con cierto detalle el argumento. «Puede uno preguntar —escribe—, si es suficiente realizar una medición por medio de un aparato autorregistrador o si se necesita la presencia de un observador.» Y llega a la conclusión de que el aparato autorregistrador es insuficiente y que «el *observador* aparece como una parte *necesaria* de toda la estructura, en su plena capacidad de ser consciente» [4].

Debemos estar agradecidos a Heitler por darnos lo que quizá sea la formulación más nítida de esta *doctrina de la implicación del sujeto con el objeto físico;* pero también aparece frecuentemente, de una y otra forma, en el libro de Heisenberg, *Physical Principles of the Quantum Theory,* y en muchos otros enunciados de la perspectiva ortodoxa.

Pero esta doctrina es simplemente *falsa:* la teoría cuántica es tan objetiva como pueda serlo cualquier teoría.

Si aceptamos el reto de Heitler, podemos describir primero un *experimento clásico que se autorregistre,* como sigue: se prepara una caja en la que se establece la disposición experimental, incluido un aparato autorregistrador. Luego se cierra la caja. La teoría predice la lec-

---

[1] [Véase la discusión en la Introducción a este tomo. *Ed.*].

[2] W. Heitler, «The Departure from Classical Thought in Modern Physics», en P. A. Schilpp, ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist,* 1949, pp. 194 y ss.

[3] N. Bohr, «Discussion with Einstein», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist, op. cit.,* p. 210 (los subrayados son de Bohr).

[4] W. Heitler, *op. cit.,* p. 194.

tura del aparato (dentro de ciertos límites que pueden ser muy estrechos). Pasado cierto tiempo, la caja emite una cinta o una película sobre la que está registrada la lectura; y la comparamos con la lectura predicha.

Ahora bien, la situación en la *teoría cuántica* es, en principio, exactamente la misma, con una sola diferencia característica: para cada experimento teórico-cuántico típico necesitamos, en vez de una caja, una *batería de muchas cajas,* todas ellas equipadas con la misma disposición experimental, o con disposiciones experimentales tan similares como podamos conseguir; y la teoría predice, en la mayoría de los casos, no el registro de una sola cinta o película emitida por cada una de las cajas, sino la distribución estadística de todas las lecturas producidas por todas esas cajas.

En algunos casos especiales, la teoría hace, incluso, ciertas predicciones, es decir, predicciones sobre cada lectura individual emitida por cada caja individual. Por ejemplo, si el experimento es con un haz diluido de electrones, y el aparato registrador consiste en dos películas colocadas en capas, una sobre la otra, que retienen «una imagen del punto a través del que pasó el electrón (o electrones)» [5], entonces *siempre* encontraremos que las imágenes en las dos películas coinciden muy exactamente. Podemos así «predecir con certidumbre el resultado de esta observación», en oposición directa a la afirmación de Heitler [6], cuyo ejemplo es idéntico al nuestro, pero llega a un resultado contrario (y, mucho me temo, «evidentemente imposible»); lo que demuestra que incluso un físico de primera categoría puede resultar despistado por la ortodoxia cuántica.

En el ejemplo concreto de Heitler, no necesitamos más que una caja; eso se debe al hecho de que el resultado en cuestión puede ser predicho con probabilidad 1 («con certeza»). Pero para los experimentos cuánticos más típicos, se necesita una *batería de cajas,* o una serie de repeticiones del experimento en la única caja.

No se encuentra, en la literatura especializada, ningún experimento que no pueda reorganizarse, por el método aquí explicado, para constituir «un aparato autorregistrador» o una batería de aparatos —en directa contradicción a la afirmación de Heitler—. *La teoría cuántica es exactamente igual de objetiva que cualquier otra teoría física* [7].

---

[5] W. Heitler, *loc. cit.*

[6] Cf. Heitler, *loc. cit.:* «Entonces es evidentemente imposible predecir con certeza el resultado de esta observación.»

[7] Esta sección contiene lo esencial de mis comentarios preliminares, como presidente, en la discusión que siguió a la conferencia del Profesor A. March sobre «*Der Gesetzesbegriff in der Physik*», en agosto de 1948, en Alpbach, Austria. *(Cf. Gesetz und Wirklichkeit,* editado por S. Moser, 1949; con mis observaciones, quería subrayar y precisar las afirmaciones de March en la p. 80.) No me referí entonces, naturalmente, a los pasajes de Heitler y Bohr, que todavía no se habían publicado.

8. EL ORIGEN DE LA CONFUSION: LA REDUCCION DEL PAQUETE DE ONDAS

¿Por qué, entonces, se malinterpreta la teoría, tan a menudo, en un sentido subjetivista? ¿Por qué cree Heitler que el observador cumple una función fundamental en el experimento en el que un haz diluido de electrones choca con dos películas colocadas horizontalmente una sobre otra?

La respuesta es perfectamente clara: el formalismo matemático —es decir, la ecuación de ondas de Schrödinger— da, combinado con la interpretación de Born, sólo la distribución de la probabilidad (densidad) de los electrones que chocan con las dos películas. No nos dice que vayan a coincidir los lugares en los que chocan los electrones en la primera y la segunda película.

Sin embargo, este último resultado puede obtenerse si tratamos el lugar del impacto del electrón sobre la primera película como una nueva condición inicial para una nueva aplicación de la ecuación de Schrödinger.

El observador —o, claro está, el físico equipado no sólo con los resultados de la observación, sino también con la ecuación de Schrödinger— parece entrar en juego explícitamente porque el *formalismo matemático* no da la predicción del resultado del experimento de las dos películas *en un solo paso*. Hacen falta dos aplicaciones del formalismo, y para aplicar la ecuación por segunda vez, parece necesaria una *observación*.

Este es, brevemente descrito, el argumento de Heitler (y de la escuela ortodoxa). Pero, en la medida en que afirma que debe intervenir un observador para hacer posible el segundo paso —la llamada *«reducción del paquete de ondas»* (al punto del primer impacto)— cuando quiera que apliquemos la ecuación de Schrödinger a unas coordenadas *cualesquiera* de un impacto en la primera película, la ecuación llevará a la predicción de que el impacto en la segunda película tendrá (muy aproximadamente) las mismas coordenadas. No hace falta ninguna observación para este resultado —ni «real» ni «potencial».

Esa es la razón de que el argumento fracase y de que nuestras cajas autorregistradoras funcionen, en el sentido de que podemos hacer predicciones con éxito, no sólo para las estadísticas de aquellos resultados que exhiben dispersión, sino también para aquellos resultados, como la coincidencia de nuestras dos películas superpuestas, que no muestran mayor dispersión.

No obstante, el argumento ortodoxo establece, aunque no intencionadamente, la incompletud del formalismo matemático.

9. LA INCOMPLETUD DEL FORMALISMO MATEMATICO DE LA TEORIA CUANTICA

Hay muchos sentidos en los que puede hablarse de la completud o incompletud de una teoría o de un formalismo matemático. La idea que usaré aquí de la completud de un formalismo matemático intenta cubrir una cierta gama de fenómenos físicos en el siguiente sentido: el formalismo es *completo* si y sólo si cubre «automáticamente» (es decir, sin necesidad de hacer un «segundo paso» no formal en el sentido de la sección anterior) cualquier predicción de los resultados experimentales que podamos obtener en la gama de fenómenos en cuestión.

La proposición de que se use el término «completo» en este sentido la hizo Niels Bohr. En su réplica a un artículo de Einstein, Podolsky y Rosen titulado «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?» [8], Bohr escribió: «Tal argumentación, sin embargo, apenas podría parecer capaz de afectar a la corrección de la descripción mecánico-cuántica, que está basada en un formalismo matemático coherente *que cubre automáticamente cualquier procedimiento de medición* tal como el indicado [9]. Puesto que la «corrección» en cuestión era el problema de la completud y puesto que con «un procedimiento de medición» cubierto por el formalismo, Bohr se refiere claramente a los resultados experimentales predictibles por medio del formalismo, podría decirse que la definición de «completo» que aquí se sugiere es lo más parecida posible a la de Bohr.

Pero, según esta definición, el formalismo es *incompleto,* en directa contradicción de la afirmación de Bohr. En realidad, la escuela ortodoxa utiliza argumentos contradictorios.

Bohr dice que el formalismo cubre automáticamente todos los casos. Pero Heitler dice que el observador tiene que intervenir; o, como expresa Heisenberg la misma cuestión: «la discontinua ''reducción de los paquetes de ondas'', *que no puede derivarse de la ecuación de Schrödinger,* es... una consecuencia de la transición de lo posible a lo real» [10]. Pero lo cierto es que no es posible insistir por un lado en que el formalismo es completo y por el otro en que su aplicación a «lo real» exige, de hecho, *un paso que no puede derivarse de él.*

Para evitar que se me comprenda mal, quiero hacer hincapié en que no creo que la incompletud aquí mencionada sea una incompletud grave. No sugiero siquiera que sea la que Einstein tenía en mente.

---

[8] *Physical Review,* 47, 1935, pp. 777-780.

[9] Niels Bohr, *Physical Review,* 48, 1935, p. 696. (Los subrayados son míos.)

[10] W. Heisenberg, en *Niels Bohr and the Development of Atomic Physics,* 1955, p. 27. (Los subrayados son míos.)

Mostraré que, a pesar de esta incompletud en el formalismo, no hay *incompletud en la teoría interpretada;* de hecho, esta incompletud concreta del formalismo es característica del tratamiento probabilista de una amplia gama de problemas que no tienen nada que ver con la física cuántica ni con la interferencia de los observadores ni nada por el estilo. Por esta misma razón, no hay necesidad de remediar esta incompletud concreta [11]. Lo único que yo quería mostrar era que el formalismo de la teoría es incompleto, precisamente en el sentido de Bohr y contrariamente a la afirmación de Bohr; y que es precisamente esta incompletud típica e inocua la que ha llevado al mito de la entrada del observador en la teoría cuántica. [Véase la discusión de la completud en el «Prefacio de 1982».]

10. UN PASEO AL AZAR Y LA «TRANSICION DE LO POSIBLE A LO REAL»

A un soldado en el desierto se le da una ruleta de bolsillo y se le ordena que la coloque, deje girar y pararse el marcador y que avance durante un minuto en la dirección indicada por el marcador; y luego, que repita estos actos, dejando que el marcador vuelva a girar y volviendo a avanzar durante un minuto en la dirección del marcador. Enseguida queda intuitivamente claro que, basándonos en estas instrucciones, obtenemos una distribución de probabilidades de la posición del soldado que se extiende, con la velocidad de la marcha del soldado, desde el punto de partida en todas las direcciones —una especie de nube que es densa en el centro y se va aclarando hacia la periferia—. (Hay una especie de principio de Huygens válido para esta nube: todo final potencial de un avance de un minuto se convierte en el centro de una nueva nube que se superpone a las otras.)

Observemos ahora al soldado, después de una hora, cuando está consultando su ruleta de bolsillo. Entonces, podemos decir que desaparece la primera nube y comienza una nueva en el punto en que hemos observado al soldado.

Esto es precisamente lo mismo que la «reducción del paquete de ondas» y ocurre, precisamente de la misma manera, en todo problema de teoría de la probabilidad del tipo llamado de la cadena de Markov, y algo más generalmente, en todo caso en el que las probabilidades *relativas* jueguen un papel esencial. Ocurre, incluso, de una forma algo más trivial, en cualquier juego parecido al de tirar peniques: en relación con la información de que hemos sacado cara, la probabilidad (relativa) de que hayamos sacado cara cambia de 1/2 a 1. Que

[11] Como lo ha intentado, por ejemplo, L. Janossy, *Annalen der Physik* (sexta serie), 11, 1952, pp. 324 y ss.

éste es fundamentalmente el mismo problema que ha perturbado a los teóricos cuánticos (que es, por tanto, el mismo problema que el de Heitler y el mismo que hace hablar a Heisenberg de la «transición de lo posible [o potencial] a lo real») lo afirmé hace muchos años, sobre todo en *L.I.C.*, sección 76.

La inocuidad de esta famosa «reducción del paquete de ondas» es, naturalmente, la razón por la que considero inocua la incompletud del formalismo: una vez que lo podamos interpretar adecuadamente, la *teoría interpretada* —en lugar del formalismo matemático como tal— será en este punto concreto tan completa como queramos que sea.

En todos estos casos, la «reducción del paquete de ondas» no tiene, naturalmente, nada que ver con una supuesta interferencia del observador o de los instrumentos de observación con los objetos observados: los soldados, e incluso los peniques, son demasiado pesados para que les molesten los pocos cuantos de luz necesarios para observarlos. Esto lo admitió, por fin, implícitamente, Heisenberg, en el artículo citado, porque ahora encuentra (pp. 25 y 27) la «transición de lo posible a lo real» también en la termodinámica clásica. Pero eso destruye la interpretación ortodoxa (o de Copenhague) que él defiende en ese artículo. Porque el núcleo de la cuestión es si la teoría cuántica es tan totalmente diferente de otras teorías probabilistas como siempre afirmó la escuela ortodoxa; si, en teoría cuántica, al contrario que en las teorías «clásicas», o «macroscópicas», nos enfrentamos, debido a la peculiaridad del objeto tratado y debido a la constante h de Planck, con una situación nueva y única.

11. PARTICULAS, ONDAS Y LA INTERPRETACION PROPENSIVISTA

El problema de partículas contra ondas, y de las relaciones entre partículas y ondas, lo han discutido durante mucho tiempo algunos de los fundadores de la teoría cuántica (sobre todo Bohr, Born, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, y, más tarde, Landé). En esas discusiones, a veces puede discernirse una cierta irritación o exasperación, dirigida sobre todo hacia Schrödinger, del que se señala que siente «un afecto personal hacia las ondas» y que «está enamorado de esa idea» [12]. La irritación es quizá más marcada entre los físicos de la generación más joven que se sienten inclinados a considerar el problema como un pseudo-problema filosófico, en vez de considerarlo físico. Porque no es un problema ni 1) del *formalismo matemático,* ni 2) de su *apli-*

[12] Cf. Max Born, «The Interpretation of Quantum Mechanics», *British Journal for the Philosophy of Science,* 4, 1953, p. 98.

cación. Sobre esos dos puntos, los partidos en litigio están de acuerdo [13]. Así, no parece que exista un problema que los físicos más duros tengan que tomar en serio.

Estos instrumentalistas duros, pragmáticos, que piensan así, deberían pararse a considerar que fue Schrödinger quien hizo el descubrimiento de la equivalencia matemática de las dos teorías; quien desarrolló por primera vez la «teoría de la transformación» (de los vectores en el espacio de Hilbert [14]), y quien escribió ya en 1926 sobre su prueba de equivalencia: «Según esa concepción» (la de Kirchhoff y Mach) «la equivalencia matemática tiene casi el mismo significado que la equivalencia física.» Así pues, si Schrödinger cree que las dos teorías, la de las ondas y la de las partículas, no son equivalentes físicamente, la razón no es que no comprenda un punto que, en realidad, nadie vio tan pronto ni, creo yo, tan claramente como él.

En realidad, Schrödinger fue demasiado generoso al conceder tanto como «casi» equivalencia física: su teoría de las ondas era una teoría tanto de electrones libres como de electrones ligados, cosa que no era la teoría de partículas, al menos en aquel momento [15].

Si el intento de Schrödinger de criticar la concepción ortodoxa dio lugar a tales réplicas, no tengo muchas esperanzas de que mis opiniones, que son solamente las de un filósofo, vayan a ser tomadas en serio por los físicos; la esperanza queda aún más reducida por el hecho de que, aunque estoy profundamente enamorado de las ondas (mu-

---

[13] También hace hincapié en esto Born, *op. cit.*, y Heisenberg, en el artículo citado en la nota 10 de la sección 9, más arriba. Los dos critican a Schrödinger: Born (en la p. 98, nota a pie de página), por basarse en las ondas 3-dimensionales, inteligibles intuitivamente, que resultan del «método de segunda cuantización» (debido a Jordan y Klein, *Zeitschrift für Physik*, 45, 1927, p. 751; y Jordan y Wigner, *ibíd.*, 47, 1928, p. 631; véase la contribución de Schrödinger a *Louis de Broglie, Physicien et Penseur*, 1952); Born dice: «El carácter estadístico de la función Ψ es introducido en un nivel aún más profundo y más abstracto.» En el segunto artículo, Heisenberg critica a Schrödinger (p. 24) por su «incomprensión de la interpretación habitual» (la ortodoxa): una incomprensión que consiste en «pasar por alto el hecho» de que en la interpretación ortodoxa, las ondas 3-dimensionales de Klein, Jordan y Wigner «no tienen conexión directa con las ondas de probabilidades», es decir, no tienen carácter estadístico, sino que «tienen una densidad continua de energía y momento, como un campo de Maxwell». Así, vemos aquí que los dos defensores de la concepción ortodoxa no están de acuerdo más que en un punto: que Schrödinger tiene que estar equivocado. Pero sus argumentos se contradicen mutuamente. (Véase también la nota 39, sección 28.)

[14] *Cf.* Schrödinger, *Collected Papers on Wave Mechanics*, 1928, pp. 45-61, esp. nota de la p. 52.

[15] En los artículos de M. Born y N. Wiener, *Journ. Math. and Phys.*, 5, 1926, p. 84, y *Zeitschr. f. Phys.*, 36, 1926, p. 174, se operaba con «matrices continuas», sin duda una adaptación *ad hoc* del método de matrices a las partículas libres. La teoría de Schrödinger, por otro lado, desarrolló la idea de De Broglie de *explicar* (no *ad hoc*) los estados estacionarios de Bohr por medio de las propiedades ondulatorias que también poseen las partículas libres y que, en su caso, son contrastables independientemente.

cho más que de las partículas [16]), creo, no obstante, que la teoría cuántica es, en un sentido muy claro, una teoría de partículas (en esto, no estoy de acuerdo con Schrödinger) y que lo es en un sentido que excluye la dualidad o la analogía o la complementariedad entre partículas y ondas. Seré más explícito: creo que las ondas (incluso las de la segunda cuantización) son representaciones matemáticas de las *propensiones,* o de las propiedades disposicionales de la situación física (tal como la situación experimental), que pueden interpretarse como propensiones de las *partículas* a adoptar ciertos estados. En la medida en que la teoría cuántica es una teoría probabilística, es una teoría de ondas o de matrices. Por ello, la teoría de ondas y la teoría de matrices son equivalentes. Pero las probabilidades que la teoría determina son siempre las propensiones de las *partículas* a adoptar cierto estado bajo ciertas condiciones.

No hay, pues, simetría ni dualidad entre ondas y partículas: las ondas describen propiedades disposicionales de las partículas. Como lo expresa Landé: «Si ésta... es la famosa *dualidad,* entonces los cisnes deben de ser... aves duales, puesto que, por un lado, *son* individuos o partículas; por otro lado, *tienen* la cualidad de un cuello ondulante; de modo que "siempre nos quedará la duda de si los cisnes son en realidad partículas u ondas". Esta dualidad es una comparación entre cosas incomparables» [17]. Estoy totalmente de acuerdo, aunque hubiera preferido una propiedad más claramente disposicional que un cuello ondulante [18]; por ejemplo, la propensión de los cisnes a hacer, en determinadas circunstancias, movimientos ondulantes con sus cuellos.

Según esta perspectiva, las partículas no aparecen, explícitamente, en el formalismo: ni en el formalismo de ondas ni en el de matrices (del que se dice a menudo que es un formalismo de partículas) ni siquiera en la teoría «neutral» de la transformación. Todas esas teorías describen las propensiones de ciertas variables a tomar ciertos valores; variables que pueden *interpretarse* como variables del estado de ciertas partículas.

---

[16] La razón es que la teoría de ondas (o de campos) ofrece una posibilidad de *explicar* la materia por medio de algo que no es materia (y que es más general que ella); para más razones, véase la nota precedente. [Véase la discusión de Popper sobre el materialismo y su historia en *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977), especialmente secciones 3-5 y capítulos P3 y P5. Véase también su «Filosofía y Física», *op. cit.,* y el «Epílogo metafísico», más adelante. *Ed.*].

[17] A. Landé, «The Logic of Quanta», *British Journal for the Philosophy of Science,* 6, 1956, p. 316.

[18] En realidad, «todos los universales son disposicionales», como he resaltado en varias ocasiones (véase, por ejemplo, mi artículo «Tres concepciones sobre el conocimiento humano», *Contemporary British Philosophy,* 3, 1956, sección vi, cerca del final, reimpreso en *El desarrollo del conocimiento científico* [*C. & R.,* 1963]. Véase también *L.I.C.,* final de la sección 25; y *Realismo y el objetivo de la ciencia,* tomo I del *Post Scriptum,* Parte 1, sección 11.) Sin embargo, unos son más disposicionales que otros.

Una de mis preocupaciones es que esta concepción no le hubiera parecido aceptable a Schrödinger. Sin embargo, no está muy alejada de su propia concepción. Hay que recordar que, según la interpretación que se ha propuesto aquí, las propensiones y los campos de propensiones son tan reales como las fuerzas y los campos de fuerzas. Son, como las fuerzas, propiedades disposicionales; y como las fuerzas o los campos de fuerzas son propiedades no tanto de las partículas como de toda la situación física; son como las fuerzas, propiedades *relacionales.*

Quizá merezca la pena explicar este punto un poco más extensamente. Una razón de que Newton encontrase difícil aceptar su propia teoría como *explicación* de la gravedad era que le resultaba difícil ver en sus fuerzas de atracción —actuando a distancia— una propiedad *inherente* o *esencial* de la materia. La extensión podía ser una propiedad esencial de un trozo de materia, porque no dependía de nada más que de ese trozo de materia. Pero la atracción era una disposición a atraer a *otros trozos de materia:* era una propiedad relacional, una propiedad mutua; y era, por tanto, difícil de concebir como *inherente* al trozo de materia, tan difícil como es considerar inherente la propiedad de un trozo de materia de ser *más extenso (más grande) que otro trozo de materia* [19]. Es nuestro hábito aristotélico y esencialista de expresarnos (unido a la preferencia habitual a usar enunciados «categóricos», es decir, de sujeto-predicado) el que nos sugiere que las propiedades relacionales no son «reales» sino «ideales»; es decir, que tienen su fundamento sólo en nuestro pensamiento y en nuestras actividades de ordenación. Es esa actitud, en último término, la que lleva a la intepretación subjetiva de las probabilidades y la que hace difícil aceptar una interpretación objetiva de la propensión.

Una vez que concedamos que las medidas de las posibilidades pueden interpretarse como propensiones a reaccionar de ciertas maneras determinadas en ciertas circunstancias dadas (condiciones iniciales y condiciones límite), nuestra interpretación en términos de posibilidades no se opondrá ya a la interpretación que propuso Schrödinger en 1926, en su cuarto artículo sobre «Quantization as a Problem of Proper Values» [20]. La diferencia entre ellas, si existe, está relacionada con el *hecho* de que no existía una teoría propensivista de la probabilidad en aquel momento y con la *concepción* de que una teoría de la probabilidad singular no puede ser objetiva y de que una teoría objetiva de la probabilidad debe ser una teoría frecuencial o *puramente* estadística. En lugar de hablar de las «medidas de las posibilidades»

---

[19] Véase también mi artículo «Tres concepciones sobre el conocimiento humano», *op. cit.*, especialmente el párrafo al que acompaña la nota 7 de la sección iii.

[20] *Annalen der Physik* (cuarta serie), 81, 1926, p. 135; *Collected Papers on Wave Mechanics,* pp. 120 y ss.

y de una «función de medida» (que determine la distribución de densidad de la medida de la probabilidad), Schrödinger habla en su artículo de un «peso» de las posibilidades —es decir, de todas las «configuraciones mecánicas puntuales [que son] cinemáticamente posibles»— y de una «función de peso». Escribe: «Podemos decir que el sistema existe, por así decirlo, simultáneamente en todas las posiciones (que son) cinemáticamente imaginables, pero no "con la misma fuerza" en todas.» Con cuánta fuerza existe en cada una de esas posiciones, lo determina una función de peso, es decir, el cuadrado de la amplitud de onda.

Schrödinger comenta: «Esta nueva interpretación puede sorprendernos a primera vista, puesto que anteriormente hemos hablado con frecuencia de "vibraciones Ψ" de una manera tan concreta intuitivamente como si se tratase de algo completamente real. Pero también hay algo tangiblemente real tras la concepción actual...» [21]. Sin duda alguna, esta perspectiva tiene mucho en común con la interpretación propensivista. Schrödinger hace hincapié en la objetividad o «realidad» de las ondas —el hecho de que las ondas pueden interactuar entre sí y también con otras magnitudes físicas—; y, al mismo tiempo, hace hincapié en el hecho de que de algún modo son menos reales, menos concretas e intuibles [22] que las ondas o vibraciones ordinarias.

Hasta aquí, concuerda con la interpretación propensivista. La diferencia es ésta: Schrödinger no interpreta su peso como una tendencia (o disposición o propensión) a realizarse que está ligada a una posible configuración o a un posible estado cinemático; una tendencia cuya fuerza o peso se expresa mediante la frecuencia estadística con la que ocurre el estado en cuestión en una sucesión de repeticiones del experimento en cuestión. Dicho de otro modo, Schrödinger no interpreta su peso como una *probabilidad,* aunque se da cuenta de que *puede* interpretarse así. En un artículo [23] escrito un año más tarde que el que acabamos de citar, escribe: «Si el lector quiere, sin embargo, puede entender todo lo que acabamos de decir..., según la teoría de Born [24], en la que... los cuadrados de las amplitudes no se interpretan como fuerzas de excitación simultánea en el sistema singular, si-

---

[21] *Loc. cit.* (He cambiado de lugar algunas palabras de la traducción.)

[22] Schrödinger hace hincapié, *loc. cit.,* en «el hecho de que la función Ψ no se pueda ni se deba interpretar directamente en términos del espacio tridimensional..., porque es, en general, una función en el espacio de configuración, no en el espacio real»; a pesar de ello, veintiséis años después, Born, *op. cit.,* le acusa de no darse cuenta de ese hecho.

[23] «The Exchange of Energy according to Wave Mechanics», 1927; véase *Collected Papers,* p. 146.

[24] M. Born, *Zeitschr. f. Phys,* 37, p. 863; 38, p. 803; 40, p. 167, 1926. (Esta nota corresponde a Schrödinger.)

no simplemente como probabilidades (frecuencias relativas de ocurrencia) de los estados cuánticos discretos en un conjunto virtual.» «Las fuerzas de excitación simultánea en el sistema singular» son, naturalmente, lo mismo que los «pesos» del artículo anterior; y puede verse claramente que Schrödinger quiere oponer aquí una propiedad objetiva del sistema *singular* —una distribución de intensidades— a una frecuencia relativa de ocurrencia en un conjunto de sistemas.

La interpretación propensivista tiende un puente sobre esta brecha. Permite que el *sistema singular* tenga tendencias o propensiones objetivas de fuerzas o pesos o intensidades variables y muestra que, si éstos se interpretan como tendencias a realizarse, llevan a frecuencias estadísticas correspondientes, en un conjunto o colectivo virtual (o real).

Schrödinger observó que «si el lector quiere, puede entenderlo todo» en el sentido estadístico. Esto indica, creo, que vio, y admitió, una conexión con la estadística, pero quiso recalcar que no le satisfacía una interpretación *puramente estadística* (en oposición a una interpretación objetiva y singular). Quizá podamos afirmar, entonces, que lo que llamamos la interpretación propensivista satisface todas las intenciones de Schrödinger —y, quizá, incluso, las de Born—, a pesar del aparente conflicto entre ellas.

12. ANTICIPACIONES PARCIALES DE LA INTERPRETACION PROPENSIVISTA

Schrödinger había resaltado, pues, desde muy pronto, uno de los aspectos más importantes de la interpretación propensivista —la objetividad y realidad de las ondas (en el espacio de configuración)— y el hecho de que las amplitudes de ondas proporcionan un peso o fuerza o medida de las posibilidades.

Born, por otro lado, resaltó lo contrario, el aspecto estadístico de nuestra interpretación. Pero también él se acercó a la interpretación propensivista completa en una observación que puede compararse con el comentario de Schrödinger citado en la sección anterior (que «si el lector quiere... puede entenderlo todo...», según la teoría de Born). Porque Born escribe: «La cuestión... de si las ondas son algo "real" o una ficción para describir y predecir fenómenos de una manera conveniente, es cuestión de gustos»[25].

Born continúa: «A mí personalmente me gusta considerar una onda de probabilidades, incluso en el espacio 3N-dimensional, como una

[25] Véase *Natural Philosophy of Cause and Chance*, p. 105. Esta observación, aunque no es una declaración abierta de intrumentalismo, contiene una gran concesión a él, por decir lo mínimo.

cosa real ciertamente... más que como un instrumento para efectuar cálculos matemáticos. Porque tiene el carácter de una invariante de observación; lo que significa que predice los resultados de contar los experimentos y esperamos encontrar los mismos números medios, las mismas desviaciones medias, etc., si repetimos realmente el experimento muchas veces bajo las mismas condiciones experimentales» [26]. Todo el pasaje parece un manifiesto de la interpretación propensivista, en el más extraño de los contrastes con la continua vacilación u oscilación, entre una interpretación subjetiva y una puramente estadística de la probabilidad, que se encuentra en el mismo libro. (Véase más arriba, sección 6.) El pasaje que acabamos de citar supone un contraste tan extraño con el extenso uso que se hace de la interpretación *subjetiva* para «resolver» las dificultades conceptuales de la mecánica estadística clásica, que uno se siente inclinado a creer, en este momento, que Born está defendiendo en el fondo una interpretación objetiva de las propensiones sólo en teoría cuántica, pero no en la estadística clásica. Pero no es así, porque, inmediatamente, a continuación del pasaje citado, Born nos sorprende arguyendo de nuevo en favor de una interpretación propensivista de la probabilidad totalmente general: «En general —escribe—, ¿cómo podríamos basarnos en predicciones probabilistas si no nos refiriésemos, con esa noción, a algo real y objetivo? Esta consideración es aplicable tanto a la función de distribución clásica... como a la matriz mecánico-cuántica de densidades...»

Esto parece un enunciado perfectamente claro de la interpretación propensivista, sobre todo cuando vemos que, a continuación, Born expone el experimento de Bohr de las dos ranuras (que es, creo yo, uno de los argumentos más fuertes en favor de la interpretación propensivista) como ejemplo para ilustrar y apoyar su teoría.

Y, sin embargo, apenas puede decirse que Born haya llegado a nada parecido a la posición que he denominado «la interpretación propensivista» de la teoría de la probabilidad o de la teoría cuántica. Hay que admitirlo, alcanzó esa posición en este preciso pasaje, pero nunca se percató de que esta interpretación merecía ser puesta a prueba; que merece un intento de llevarla a término *consistentemente;* en cambio, él la toma como una de las formas «complementarias» de mirar a la situación, para uno u otro propósito. Esto explica la concesión que Born hace al instrumentalismo en su observación inicial, citado más arriba. Explica el hecho, de otro modo incomprensible, de que en el mismo libro en que se hace este elocuente alegato en favor de una interpretación general completamente objetiva de la probabilidad,

[26] La frase en cursiva (las cursivas son mías) es claramente antiinstrumentalista en su tendencia, al contrario que la observación del comienzo. Todo el pasaje es de *op. cit.,* pp. 105 y ss.

la mecánica estadística se desarrolle y defienda elaboradamente como una teoría puramente subjetiva. Y explica por qué, tres años después de la publicación de este libro, Born pudo escribir sobre «la interpretación estadística de la mecánica cuántica» lo siguiente: «Esta no es una cuestión sencilla y no sólo exige el conocimiento de un complicado formalismo matemático, sino también una cierta actitud filosófica: la voluntad de sacrificar conceptos tradicionales y aceptar otros nuevos, como el principio de complementariedad de Bohr». Ahora bien, respecto al «conocimiento de un complicado formalismo matemático», hay que decir que si se toma en serio el elocuente alegato de Born en favor de una interpretación general completamente objetiva de la probabilidad, no puede sostenerse esto; porque en ese caso, el problema de interpretar la probabilidad en juegos tales como el de tirar monedas, sería fundamentalmente el mismo que el de interpretar la probabilidad en la teoría cuántica. Y no habría ninguna necesidad de apelar al principio de complementariedad de Bohr.

Destaca, entre otros que anticiparon en parte la interpretación propensivista, Dirac. También hay que mencionar a Jeans [27].

En un artículo de Heisenberg se encuentra asimismo una clara formulación de la interpretación propensivista; y sorprendentemente, Heisenberg pretende que es la concepción ortodoxa. Pero pronto resulta que Heisenberg no utiliza la interpretación que con tanta claridad describe —de la misma manera que no lo hace Max Born—. Cree realmente que es equivalente a la vieja concepción ortodoxa de la complementariedad, y vuelve a caer en su vieja doctrina de la perfecta dualidad entre partículas y ondas, de los saltos cuánticos (y considera que la reducción del paquete de ondas es un ejemplo de ellos), del papel del observador y de todos esos fantasmas ortodoxos cuyo exorcismo es uno de los resultados secundarios de la interpretación propensivista, cuando se comprende plenamente.

En este artículo, Heisenberg atribuye la introducción de lo que yo llamo la interpretación propensivista al famoso artículo de Bohr, Kramers y Slater (1924), que fue precursor de la mecánica cuántica: «... la... interpretación de Bohr, Kramers y Slater —escribe Heisenberg—... contenía algunos rasgos muy importantes de la interpretación posterior, correcta. El más importante de ellos era la introducción de la probabilidad como un nuevo tipo de realidad física "ob-

[27] Sir James Jeans, *The New Bakground of Science*, 2.ª ed., 1934. En las pp. 229 a 233 hay un comienzo, por así decirlo, de una discusión muy prometedora sobre probabilidad subjetiva *versus* probabilidad objetiva; pero, aunque es muy instructiva, la discusión no conduce a ninguna propuesta positiva. Esto lo reconoce el autor en la p. 241, donde resume la discusión diciendo: «Describimos allí las ondas de la imagen ondulatoria como "ondas de probabilidad", pero fuimos incapaces de atribuir un significado preciso al término.» En lo que sigue, Jeans adopta la interpretación subjetiva («nuestra falta de conocimiento preciso», p. 242).

jetiva''. Este concepto de la probabilidad está estrechamente relacionado con el concepto de la filosofía natural de los antiguos, como Aristóteles; es, hasta cierto punto, una transformación del viejo concepto de *''potentia''* de idea cualitativa a idea cuantitativa» [28].

La atribución de una nueva idea de probabilidad objetiva de este tipo —la probabilidad como medida de una potencialidad o disposición o propensión— a la obra de Bohr, Kramers y Slater es sorprendente, aunque quizá defendible, a pesar de que la idea está, en el mejor de los casos, sólo implícita en su enfoque. Pero encontré aún más sorprendente ver esta idea descrita como uno de los «rasgos muy importantes de la interpretación posterior, correcta», que Heisenberg identifica con la «interpretación de Copenhague», desarrollada en 1927 por Bohr y él mismo *(op. cit.,* p. 15); yo, por lo menos, no encontré huellas de esta idea en ninguno de los primeros artículos de Bohr ni de Heisenberg; y esto no es casual. Porque según la interpretación ortodoxa, de Copenhague, ideas tales como el papel de la observación y de la medición son de importancia decisiva y las relaciones de indeterminación, que excluyen las mediciones precisas, tienen como función principal la de introducir en la teoría un elemento de incertidumbre y con él, consideraciones probabilísticas. En otras palabras, la teoría de la probabilidad entra en escena a causa de ciertas limitaciones que la teoría impone sobre las mediciones y, por tanto, sobre la precisión de *nuestro conocimiento,* lo que da a la teoría *su característica mezcla de elementos objetivos y subjetivos.* De pronto parecía que todo esto se había desechado y que una interpretación puramente objetiva de la potencialidad o propensión ocupaba ahora su lugar.

Sin embargo, no había razón para alarmarse. A pesar del pasaje citado, no había cambio real en la teoría ortodoxa. Exactamente igual que en el caso de Born, las potencialidades reales de la *potencia* aristotélica, es decir, de nuestra propensión, no se realizan en el artículo de Heisenberg. Heisenberg sigue operando con los misterios cuánticos, los «tres artículos de fe», como los llama Landé [29]: dualidad, incertidumbre y complementariedad; y, además, con todos esos misterios y horrores cuánticos gratuitos, tales como la confusión de objeto y sujeto, las «transiciones de lo posible a lo real» como consecuencia de nuestras mediciones y los saltos cuánticos.

Entre los que anticiparon la interpretación propensivista, sólo Landé trató de aplicarla sistemática y consistentemente para, con su ayuda, desvelar la mayor parte de los famosos pero gratuitos misterios cuánticos. Yo creo que le pertenece a él la prioridad en esta

[28] Véase W. Heisenberg, «The Development of the Interpretation of the Quantum Theory», en *Niels Bohr and the Development of Physics,* 1955, pp. 12 y ss.

[29] «The Logic of Quanta», *British Journal for the Philosophy of Science,* 6, 1956, p. 301.

interpretación [30]. Primero, Landé establece la necesidad de una probabilidad objetiva y singular (véase *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo,* tomo II de este *Post Scriptum);* reconoce que este paso implica, por sí sólo, el rechazo del determinismo; basa la teoría en probabilidades relativas o de transición [31]; y, lo más importante, trata de *explicar,* sobre esta base, las reglas cuánticas que, como él señala, se han convertido en artículos de fe.

Sólo hay un punto importante en donde yo creo que Landé no explota a fondo el poder de la interpretación propensivista. Es en su intento de explicar «los modos de interacción... simétricos... y antisimétricos» por medio de «*la indiscernibilidad de partículas idénticas* en todos los aspectos de la observación» [32]. Esta explicación no es satisfactoria; ni tampoco necesaria. El recurso al principio de Leibniz no está justificado en absoluto, puesto que Leibniz no se refiere a los indiscernibles *bajo observación;* por otro lado, el principo positivista de la identidad de los indiscernibles *bajo observación* me parece insostenible, por no decir que repugnante [33].

Pero el punto principal es que una aplicación decidida de la interpretación propensivista hace innecesaria la apelación a un principio distinto. Porque el principio de exclusión de Pauli puede ser incorporado como parte de la teoría ondulatoria del electrón bajo la forma del postulado de que, de las tres clases posibles de simetría, sólo ocurre la clase antisimétrica [34]. De esta forma, no se refiere a las partículas indistinguibles. Y desde el punto de vista de la interpretación

---

[30] [Para la obra de Landé, véase su *Foundations of Quantum Theory,* 1955; *From Dualism to Unity in Quantum Physics,* 1960; y *New Foundations of Quantum Mechanics,* 1965. *Ed.*].

[31] Estas son las cadenas de Markov sobre las que Fényes basa su desarrollo más elegante; *cf.* J. Fényes, *Zeitschrift für Physik,* 132, 1952, pp. 81-106; véase especialmente pp. 103-5. Ahí se muestra que la teoría cuántica, es decir, la ecuación de Schrödinger, es deducible de la teoría de la difusión estadística en conjunción con un principio clásico de variación, la ecuación diferencial de Euler-Lagrange. (El significado físico de esta conjunción carece todavía de una discusión cuidadosa.)

[32] Landé, «The Logic of Quanta», *op. cit.,* pp. 319 (3), 313; véase también sus *Foundations of Quantum Theory,* p. 65.

[33] Véase mi artículo «El lenguaje y el problema del cuerpo y la mente», *Proceedings of the XIth International Congress of Philosophy,* 7, 1953, pp. 101 y ss. [Reimpreso en *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.,* 1963). *Ed.*]. Como se indicaba allí, si dos billetes de banco son indistinguibles bajo observación (incluso en su numeración), uno de los dos puede ser auténtico, pero tenemos todas las razones para creer que uno de los dos tiene que ser falso. Y una falsificación no se convierte en algo auténtico porque sea una falsificación perfecta.

[34] Véase, por ejemplo, W. Pauli, «Exclusion Principle and Quantum Mechanics», *Les Prix Nobel en 1946,* esp., pp. 135 y ss. Pauli expresó allí, con toda justicia, en la p. 136, su desilusión por el hecho de que la nueva teoría cuántica no consiguiera explicar (o deducir) el principio de exclusión. Pero la forma en que hay que suponerlo me parece mucho menos *ad hoc* que la aplicación de Landé de lo que él llama el «principio de Leibniz».

propensivista, supone que es cero la probabilidad de encontrar un sistema que viole los diversos corolarios (tales como el que establece las estadísticas de Fermi-Dirac) del principio de exclusión.

13. ¿EXISTEN LOS SALTOS CUANTICOS?

El título de esta sección está tomado de un artículo de Schrödinger [35] en el que, creo yo, muestra que la teoría cuántica no autoriza una interpretación según la cual existan los saltos cuánticos.

Los saltos cuánticos fueron introducidos por primera vez por Bohr con su modelo atómico de 1913. Eran transiciones súbitas de electrones de un estado estacionario a otro, unas transiciones de las que se dijo entonces que no tomaban ningún tiempo. Sin embargo, la emisión de un cuanto de luz (que la teoría liga a la transición) sí que toma tiempo, según la nueva teoría cuántica y según los experimentos. Desde el punto de vista de la teoría, el hecho de que la emisión tome tiempo puede verse, por ejemplo, por las relaciones de indeterminación, puesto que, de otro modo, la frecuencia (energía) del cuanto tendría que ser indeterminada. Desde el punto de vista del experimento, el tiempo medio puede calcularse, por ejemplo, a partir de la longitud media de un tren de ondas coherente (de 3 a 4 pies de longitud) [36].

Los saltos cuánticos son una vieja aversión de Schrödinger. Yo, personalmente, no siento ninguna antipatía por ellos: estaría perfectamente dispuesto a aceptarlos si los físicos pudieran dar buenas razones para ello. Pero ya no creo que existan esas razones; al menos, no se da ninguna en las dos réplicas (algo contradictorias) que recibió el artículo de Schrödinger, una de Max Born [37] y otra posterior de Heisenberg [38]. Born, por lo que yo veo, no contesta en absoluto a la pregunta de Schrödinger. En cambio, discute una cuestión totalmente diferente, que introduce en el título de su sección 2: «*¿Existen los átomos?*» Pretende que la intención real de Schrödinger es negar la existencia de los átomos. Esto parece una interpretación errónea y completamente inexplicable de las concepciones de Schrödinger y, sobre todo, de lo que dice en el lugar criticado por Born. La teoría de Schrödinger puede explicar los átomos (no como ondas, sino como *estructuras* ondulatorias), pero no los descarta.

---

[35] E. Schrödinger, «Are There Quantum Jumps?», *British Journal for the Philosophy of Science*, 3, 1952, pp. 109-123 y 223-242.

[36] Schrödinger, *op. cit.*, p. 113. Implícitamente, todo esto ya lo había señalado Planck en 1923 (Prefacio a la 5.ª ed. de su *Theorie der Wärmestrahlung*), y Bohr lo había admitido en 1927; *cf. Atomic Theory and the Description of Nature*, 1934, pp. 81, 83 s. y 86 s. Véase también la Introducción a este volumen, nota 38a.

[37] M. Born, «The Interpretation of Quantum Mechanics», *Brit. Journ. Phil. Sc.*, 4, pp. 95-106 (citado anteriormente).

[38] Heisenberg, *op. cit.*

Mientras que Born no responde a la pregúnta de Schrödinger en su artículo [39], Heisenberg lo hace. Al principio no parece decir nada más que Born, porque recurre (en lugar de a la existencia de átomos) a la existencia de «un elemento de discontinuidad... que se encuentra por todas partes en la física atómica (de manera muy obvia, por ejemplo, en la pantalla de centelleo)» [40]. Con esto, claramente, Heisenberg no nos lleva ni un paso más lejos que Born. Que los centelleos sean una novedad para Schrödinger también lo es para mí; pero parece que ya nadie sepa que Schrödinger nunca negó esas discontinuidades, sino que trató de *explicarlas* —y no fracasó totalmente—. Pero después de esto, Heisenberg hace una sugerencia definida respecto a nuestra cuestión; dice: «En la interpretación habitual de la teoría cuántica esto» (''esto'' es la discontinuidad y, presumiblemente, el salto cuántico) «está contenido en la transición de lo posible a lo real.» Hecha de esta manera su contrapropuesta a la proposición de Schrödinger de que se abandone el mito de los saltos cuánticos, Heisenberg concluye su crítica de Schrödinger —del hombre que explicó los estados estacionarios y los números cuánticos— diciendo: «El propio Schrödinger no ofrece propuesta alternativa de cómo piensa introducir el elemento de discontinuidad, observable en todas partes, de una manera diferente a la de la interpretación habitual» (¿los valores característicos [eigenvalues] no eran una contrapropuesta?).

Así, Schrödinger recibe dos respuestas: la primera alega que su negación de los saltos cuánticos equivale a una negación de los átomos y otras «discontinuidades»; y la segunda sugiere que los saltos cuánticos son idénticos a la famosa, o más bien tristemente famosa, «transición de lo posible a lo real» —es decir, idénticos a la «reducción del paquete de ondas».

Discutí esta reducción hace mucho tiempo, en *L.I.C.*, sección 75, y lo he vuelto a hacer, en la sección 8 de este mismo libro. Sin duda, la reducción del paquete de ondas puede ocurrir de modo muy repentino; incluso con velocidad superior a la de la luz, como expliqué en la sección 75 de *L.I.C.;* porque, simplemente, no se trata de un suceso físico, se trata del resultado de la libre elección de nuevas condiciones iniciales (o de usar un nuevo valor de *b* en «*p(a,b)*»).

Lo más notable es que el propio Heisenberg, en el mismo artículo, admite que esta «reducción» no es un efecto cuántico; porque dice (p. 27) que es, «exactamente igual que en la termodinámica de Gibbs, una consecuencia de la transición de lo posible a lo real». Así, su respuesta a Schrödinger equivale a la afirmación de que *existen* los sal-

[39] Descuido aquí la discusión de Born sobre *colisiones, op. cit.*, p. 104; aunque parece ser (como me señaló Dr. Agassi) que al limitar su discusión a la teoría estacionaria de las colisiones, no toca el argumento de Schrödinger.

[40] Heisenberg, *op. cit.*, p. 24. *Cf.* también pp. 26 y ss., para la «reducción del paquete de ondas».

tos cuánticos, exactamente igual que existen los saltos cuánticos en la teoría clásica.

Estas respuestas sugieren con fuerza que realmente no parece haber evidencia de la existencia de los saltos cuánticos. Pero, si es así, ¿por qué no decirlo? ¿Y por qué atacar a Schrödinger cuando lo dice?

Si miramos ahora al problema desde el punto de vista de la interpretación propensivista, quizá resulte un poco más claro en un punto. En primer lugar, está claro que no puede haber saltos cuánticos en el sentido antiguo, a causa del principio de indeterminación (con respecto al tiempo y la energía). En segundo lugar, la «reducción del paquete de ondas» no es, desde luego, un salto cuántico, independientemente de lo que diga Heisenberg; porque, de otro modo, los soldados y los peniques darían saltos cuánticos. En tercer lugar —y éste es el resultado de la interpretación propensivista— la teoría cuántica no es una teoría que describa procesos dinámicos en el tiempo, sino una teoría propensivista probabilística que da peso a las distintas posibilidades. Así pues, incluso allí donde no supone que un proceso tome tiempo, el proceso *puede,* no obstante, tomar tiempo. Estoy pensando en el caso de la interacción entre una partícula y un polarizador; parece que la partícula «salta», a consecuencia de esta interacción, a uno de dos estados, polarizándose bien perpendicular, bien paralelamente al eje óptico del polarizador. Esto lo sugiere no sólo Dirac[41], por ejemplo, sino también Landé[42].

Ahora bien, esto puede ser verdad, por lo que yo sé (aunque no creo que lo sea). Pero me parece bastante claro que nadie sabe que sea cierto ni siquiera que sea una consecuencia de la teoría. Todo lo que la teoría nos dice —en su interpretación propensivista— es que hay ciertas propensiones a que las partículas tomen uno u otro de los dos estados al interactuar. Incluso nos dice que los procesos comparables a ése toman tiempo (como la interacción con un filtro que absorbe la luz, por razones análogas a las relacionadas con la emisión de un cuanto de luz).

Así, me parece que está claro que, también en este caso, *la teoría no implica que existan los saltos cuánticos;* y yo creo que eso es lo que dijo Schrödinger; aunque no sólo lo dijo mucho mejor, sino que además hizo otras muchas sugerencias interesantísimas para el desarrollo ulterior de la teoría.

14. ¿EXISTEN LAS PARTICULAS?

Hemos visto que Born y Heisenberg responden a la oportuna pregunta de Schrödinger «¿existen los saltos cuánticos?» sugiriendo que

---

[41] Dirac, *The Principles of Quantum Theory,* 3.ª ed., 1947, p. 7.

[42] Landé, *Foundations of Quantum Theory,* p. 18.

lo que Schrödinger quería preguntar en realidad era «¿existen los átomos?» o «¿hay discontinuidades?». He tratado de mostrar que esas sugerencias son, en cierto modo, evasivas y muy poco justas para con Schrödinger.

Pero no hay razón para no abordar la cuestión propuesta. ¿Existen las partículas? ¿Existen los átomos, electrones, fotones, nucleones y la multitud de partículas que se han descubierto en los últimos veinticinco años? La respuesta tiene que ser un «sí» *con reservas*.

Para dejar claro lo que quiere decir un «sí» *con reservas*, tenemos que distinguir primero entre dos preguntas diferentes. La primera es si algún científico cree, o conjetura, que existen las partículas. La segunda es si la existencia de las partículas está entrañada en la *interpretación* del formalismo mecánico-cuántico actual.

La respuesta a la primera pregunta es que Schrödinger cree, sin duda alguna, que existen las partículas, pero que fue él el primero de los teóricos cuánticos que vio la posibilidad de explicar las partículas por algo distinto y la necesidad de tal explicación. Lo hizo en un momento en que «las partículas elementales», que era como se llamaba entonces normalmente a los electrones y protones, eran todavía consideradas, por lo general, ladrillos indestructibles. Hoy, ya no usamos la palabra «partícula» con la connotación de que esas cosas son indestructibles. *Pero no hay que olvidar que la primera sugerencia de que las partículas pudieran tener una vida limitada provino de la teoría de Schrödinger.*

Nadie, y menos Schrödinger, sugeriría que esa teoría tuvo éxito en todos los aspectos. Pero su posición fundamental —que las partículas no son primarias, sino que *requieren una explicación*, en términos de algo diferente de las partículas— difícilmente podrá cuestionarse.

La teoría de Schrödinger fue el primer intento y, fundamentalmente el único, en esa dirección y podríamos decir que el nuevo significado del término «partícula» debe mucho, si no todo, al hecho de que hayamos aprendido, por esa teoría, a pensar en términos de partículas que no son primarias o «elementales». Dicho de otro modo, aunque no parece que su teoría proporcione una explicación satisfactoria de las partículas y sus transiciones, ha mostrado que se puede dar una explicación y cómo puede darse. En realidad, esto es todo lo que tenemos a modo de enfoque de la teoría en este terreno.

Tenemos que tener presente todo esto si queremos evaluar la observación de Heisenberg de que «el propio Schrödinger no ofrece propuesta alternativa de cómo piensa introducir el elemento de discontinuidad» —por ejemplo, la discontinuidad debida a la existencia de partículas— También tenemos que tenerlo presente si queremos analizar los comentarios de Pauli sobre la «oposición» contra la escuela ortodoxa: «No falta la oposición —escribe Pauli—, pero ha perma-

necido estéril y aferrada a un estado de esperanza regresiva [o retrógrada]... El sector de la oposición al que pertenece Schrödinger —continúa Pauli con marcada ironía—, sostiene que las ondas son más bellas que las partículas y, por tanto, trata de eliminar el concepto de partícula...» [43]. No puedo evitar la sensación de que la ironía está fuera de lugar: nadie quiere «eliminar» el concepto de partícula, pero algunos pensaron, y siguen pensando, que puede resultar que no sea una categoría primaria e irreducible de la física. De hecho, me sorprendería si Pauli o Born o cualquier otro miembro de la ortodoxia negase esto. ¿Por qué atacar, entonces, a Schrödinger, por ser el primero en plantear el problema y por ser el primero en abrir nuestros ojos a la posibilidad de partículas inestables? Explicar una cosa no equivale a descartarla.

Definiré brevemente mi propia opinión respecto a la primera cuestión. Me siento inclinado a decir que la teoría de Schrödinger, según la cual las partículas son estructuras ondulatorias bastante simples («paquetes de ondas») es demasiado simple y resulta refutada por el carácter de la transición de las partículas. Las estructuras de las partículas son más complejas, yo creo, y el paquete de ondas debería interpretarse como determinante de las propensiones (como se explicará más adelante) en vez de como una descripción de la estructura de la partícula. Pero ésta, como cualquier otra concepción de la cuestión, debe estar, si es en absoluto sostenible, en profunda deuda con la teoría de partículas de Schrödinger, que fue verdaderamente revolucionaria. *(Cf.* sección 26, más abajo.)

La respuesta a la segunda pregunta —si la interpretación de la teoría cuántica actual entraña la existencia de las partículas— depende, naturalmente, de la interpretación que se escoja. Born, Pauli y Heisenberg dan a entender claramente que la existencia de las partículas forma parte de la intepretación que ellos aceptan, que es la interpretación ortodoxa o de Copenhague, y que difieren de Schrödinger en ese punto. Encuentro que esto es un poco sorprendente; porque antes de que surgiera la polémica en torno al artículo de Schrödinger «Are There Quantum Jumps?» [¿Existen los saltos cuánticos?] yo hubiera pensado que la concepción de Copenhague sobre esta cuestión sería muy diferente. Yo hubiera pensado que, según esa concepción, las partículas y las ondas no serían *nada más* que dos tipos de «imágenes» que usamos para poder *aplicar* el formalismo teórico-cuántico, y que eran necesarias porque toda aplicación tiene, por fuerza, que usar modelos e ideas clásicas. Los conceptos de «partículas» y «ondas» se usan solamente porque son precisamente ideas clásicas. Respecto a su realidad o existencia, pensé que la interpretación de Copenhague adoptaba la perspectiva de que no debía hacerse esta pregunta, o, al me-

[43] W. Pauli, *Dialectica*, 8, 1954, p. 115.

nos, que la respuesta sería que no existe nada parecido a las partículas o a las ondas y que las partículas y las ondas son sólo conceptos clásicos con los que describimos ciertos aspectos (aspectos complementarios) de lo que quiera que sea lo que existe. Esta, creía yo, era la concepción ortodoxa. Pero nunca se sabe.

(Esta ortodoxia es todavía más escurridiza de lo que suelen ser las ortodoxias. Todavía no se dispone de una Biblia para la exegesis; por tanto, la exegesis no debe ser intentada por nadie que esté fuera de esta esotérica ortodoxia. Y la exegesis ortodoxa es, a veces, indistinguible de un cambio subrepticio de fachada.)

Contrariamente a esta perspectiva, yo hubiera creído que Schrödinger afirmaba con énfasis la existencia real de átomos y partículas, aunque tratase de explicarlos como estructuras ondulatorias. Yo no sabía que al decir que una mesa o una silla está hecha de madera, me exponía a ser criticado por haber negado la existencia de mesas y sillas separadas y por haberlo hecho porque «estaba enamorado» de la madera (como dice Born de la actitud de Schrödinger respecto a las ondas [44]).

Tampoco recuerdo que en la larga historia de la polémica sobre la teoría ondulatoria de la luz nadie dijera nunca que los que mantenían esa teoría eran de la opinión de que la luz —o, más exactamente, los rayos de luz— no existían. El caso es perfectamente análogo, puesto que Schrödinger explicó la transición de la mecánica de partículas a la mecánica de ondas como un paso que correspondía exactamente a la transición de la teoría radial de la luz (óptica geométrica) a la teoría ondulatoria.

Pero no seguiré investigando la actitud de los distintos intérpretes de la teoría cuántica existente hacia nuestro problema de si «existen las partículas». En cambio, indicaré brevemente cuál sería la respuesta desde el punto de vista de la interpretación propensivista.

La respuesta sería ésta: la teoría cuántica actual, vista desde la interpretación propensivista, es una teoría de partículas. Las ondas no hacen más que determinar los *estados* probables de la partícula, es decir, la probabilidad o propensión de la partícula a estar en un lugar determinado o a poseer un momento determinado; exactamente como hacen las ondas en el paseo al azar del soldado. Las ondas no constituyen las partículas, de la misma manera que las ondas, en el ejemplo del paseo al azar, no constituyen al soldado. Pero, igual que las ondas en el ejemplo del paseo al azar son características de las condiciones de la situación, o de toda la disposición experimental, lo mismo ocurre con las ondas en la teoría cuántica.

Por tanto, me declaro inequívocamente en favor de una interpretación en términos de partículas, aunque estoy enamorado de las on-

[44] Born, *British Journal for the Philosophy of Science*, 4, 1953, p. 98.

das. No creo que haya ninguna contradicción en estar enamorado de una idea —creer que hay mucho que aprender de ella— y afirmar, al mismo tiempo, que esa idea no encaja en la situación de un cierto problema. La teoría ondulatoria de la partícula, de Schrödinger, está llena de promesas y marca el comienzo de una teoría de las partículas. Pero, al mismo tiempo, la teoría actual se interpreta con la mayor facilidad como una teoría de partículas.

Para evitar cualquier malentendido, quiero dejar claro que no creo que haya dualismo entre ondas y partículas ni nada lejanamente parecido. Respecto a las ondas piloto de De Broglie, sugiero que la mejor manera de interpretarlas es como ondas de propensiones.

15. ESPACIO DE POSICION

La idea de «partícula» ha cambiado, como hemos visto, desde la de algo primario e indestructible a la de algo cambiante y necesitado de explicación. ¿Por qué seguimos usando el término «partícula»? La cuestión no es importante, pero tampoco carece por completo de interés, en vista de las protestas que ha suscitado la supuesta incredulidad de Schrödinger respecto de su existencia.

La fuerte inclinación (que yo comparto) a hablar de «partículas» está sin duda relacionada con la idea intuitiva de que una partícula es algo localizado en cualquier momento en una pequeña región del espacio, cuya trayectoria conexa en el espacio puede, en principio, seguirse por medio de las diversas posiciones que ha ido ocupando. Con «espacio» no me refiero aquí a «espacio de momentos» o a «espacio-tiempo» o a ningún espacio abstracto, sino al espacio corriente o, como podemos llamarlo, *espacio de posición*.

La trayectoria de una partícula en una cámara de niebla de Wilson o en una pila de placas fotográficas de Powell (que es fundamentalmente lo mismo) es el tipo de trayectoria en el espacio de posición que tengo en mente; así pues, las cámaras de Wilson y las pilas de Powell son, esencialmente, partes del espacio de posición.

No deja de tener interés señalar que *todos* nuestros experimentos con partículas y, más en general, con sistemas mecánico-cuánticos, consisten en interpretar mediciones de posición. Esta afirmación es incluso trivial, como quedará claro con pensarlo un poco. Todas las mediciones de velocidades o de momentos consisten esencialmente en interpretar mediciones de posición. Esto ocurre incluso con los corredores, los coches o los aviones, cuyas velocidades podemos calcular a simple vista; si queremos medir sus velocidades, o bien mediremos dos posiciones o leeremos la posición de un marcador en un velocímetro. Con partículas atómicas o subatómicas, la situación es exac-

tamente la misma. Para medir el momento, medimos la posición; y, por regla general, hace falta más de una posición.

Esto es cierto para cualquier método que utilice espectroscopios, porque es la posición final del fotón la que es indicativa de su frecuencia o momento; y ello es así aunque usemos un filtro: el punto esencial es que la partícula ha *pasado* el filtro, lo que es una cuestión de su localización en el espacio de posición.

Bohr ha dicho algo muy parecido a lo que quiero argüir. Porque escribe: «... hay que percatarse de que... el uso de conceptos espacio-temporales en la descripción de los fenómenos atómicos se reduce al registro de observaciones que se refieren a marcas sobre una placa fotográfica o a... efectos similares de amplificación como la constitución de gotas de agua en torno a un ión en una cámara de niebla [45]. La observación de Bohr contiene una oportuna advertencia respecto a que, incluso la «observación» de una parte de la trayectoria de la partícula en el espacio de posición es, como todas las «observaciones», en realidad una *interpretación* a la luz de teorías, a pesar de su evidencia aparentemente intuible. La medición del *momento* de una partícula será, por tanto, una interpretación de una interpretación; es decir, una interpretación de orden superior. (Puede decirse, de paso, que todas nuestras mediciones son interpretaciones de un orden muy elevado; tan elevado, de hecho, que a menudo no podemos siquiera comparar las interpretaciones para saber si son de orden superior o inferior.)

El hecho de que todas las mediciones del momento retrocedan a mediciones de posición es, como explicaré en el capítulo siguiente, de considerable importancia para una evaluación del llamado «Principio de Indeterminación» de Heisenberg.

---

[45] *Cf.* N. Bohr, «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», en *Albert Einstein, Philosopher-Scientist,* pp. 222 y ss.

CAPITULO III

HACIA UNA RESOLUCION DE LAS PARADOJAS DE LA TEORIA CUANTICA

16. ¿INDETERMINACION O DISPERSION?

Lo que llevo dicho hasta este momento en este tomo del *Post Scriptum* tiene un carácter principalmente introductorio. Hay dos excepciones: mi discusión de la objetividad de la teoría cuántica y la de la llamada «reducción del paquete de ondas». Procederé ahora a dar un esquema del modo en que la interpretación propensivista resuelve las diversas paradojas de la teoría cuántica. Con este fin, discutiré, en esta sección, las relaciones de indeterminación y en las dos secciones siguientes, el experimento de Einstein, Podolsky y Rosen y el llamado «experimento de las dos ranuras».

Mis concepciones respecto a las llamadas «relaciones de indeterminación» de Heisenberg no han sido afectadas prácticamente por mi transición de la vieja interpretación frecuencial de las probabilidades a la interpretación propensivista. (Esto se debe a la similaridad de las dos interpretaciones cuando se trata de explicar la reducción del paquete de ondas.)

La fórmula

$$\Delta x \, \Delta p_x \geqslant h$$

explicada en la sección 73 y discutida en la sección 75 de *L.I.C.*, sigo considerándola parte del formalismo que tenemos que interpretar; y sigo interpretándola como una relación de dispersión. El único cambio es que ahora debo interpretar la fórmula como un enunciado de probabilidad *singular* y, por tanto, como determinante de la propensión de una sola partícula a «dispersarse»: la fórmula predice que la dispersión estadística real se observará si *repetimos* el experimento en cuestión muchas veces, cada vez con una sola partícula.

Así, sea Δx la anchura de una ranura en la dirección x (horizontal) y sea que un haz de partículas monocromáticas —fotones o electrones— caiga verticalmente sobre la ranura, como lo muestra la figura 4.

La fórmula nos dice que cuanto más estrecha hagamos la ranura, mayor será la propensión de las partículas a dispersarse hacia la derecha o hacia la izquierda de la dirección vertical. *Eso es todo.* La inter-

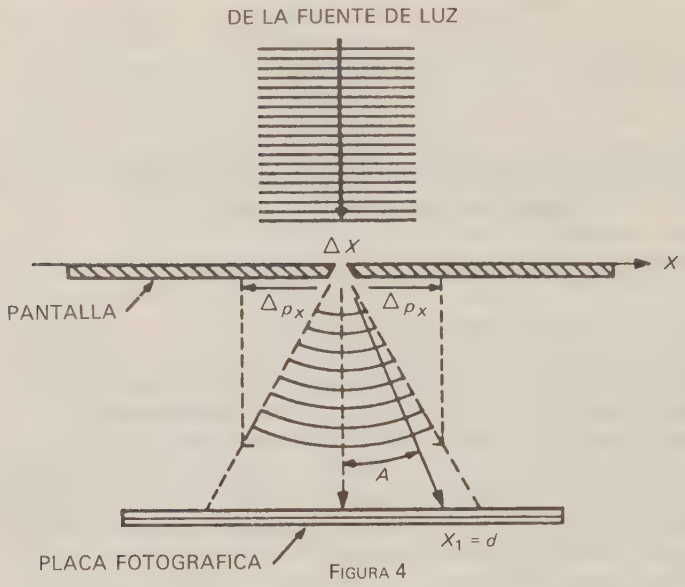

FIGURA 4

pretación es objetiva y nada en ella concierne al sujeto, a su interferencia con el objeto y a su necesaria nesciencia. La fórmula, incluso la fórmula interpretada, *no puede* contener nada referente a esas cuestiones, puesto que las fórmulas del cálculo se interpretan (como en *L.I.C.*, sección 75) como fórmulas objetivas.

Pero podemos decir un poco más. Siguiendo lo que dije en *L.I.C.*, podemos decir que esas relaciones de dispersión son *contrastables*. Las contrastamos poniendo una placa fotográfica en el camino del haz al emerger de la ranura (véase figura 4). Nuestra predicción es: si repetimos el experimento con mucha frecuencia, con una anchura fija Δx de la ranura, entonces encontramos que las partículas ennegrecen la placa en una región como lo indica la fórmula. Y si disponemos varias sucesiones del experimento, cambiando la anchura de la ranura, entonces encontraremos que el tamaño de la región ennegrecida en la placa varía de forma (aproximadamente) inversa, de acuerdo con las relaciones de dispersión.

No creo que nadie niegue que las relaciones de dispersión *puedan* interpretarse y contrastarse de este modo: el experimento puede realizarse fácilmente [1].

[1] [Véanse otras discusiones de esta cuestión por Popper en *Conocimiento objetivo (Obj. Kn.*, 1972), pp. 273-277, y «The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability and the Quantum Theory», *op. cit.* Véase también la discusión, más elaborada, en la Introducción a este volumen, sexta tesis. *Ed.*].

Pero ahora afirmo —como lo hice anteriormente— que esta contrastación implica: 1) que tenemos que tener *conocimiento* retrodictivo más allá del permitido por la interpretación subjetiva usual, y 2) que este conocimiento no es «carente de sentido» ni «superfluo» ni «gratuito», sino muy pertinente; porque es precisamente ese conocimiento retrodictivo el que nos permite *contrastar* la teoría.

1) El ennegrecimiento de nuestra placa fotográfica es el resultado de muchos experimentos singulares. Tomemos uno de ellos: el resultado será un solo golpe de una partícula en el lugar x_1 de la placa, por ejemplo. Esto nos permite determinar el ángulo A (entre la dirección vertical y la dirección desviada que toma la partícula), y, por tanto, el momento de la partícula en la dirección x. Así pues, nuestra medición x_1 en el espacio de posición puede, en este caso, interpretarse también como una medición del momento. Como consecuencia, obtenemos la posición y el momento de la partícula con una precisión que excede en mucho las relaciones de indeterminación.

2) Admitámoslo, el conocimiento así obtenido es retrospectivo o retrodictivo en lo que respecta al momento. (En lo que respecta a la posición, el conocimiento es predictivo en que, en una segunda placa, puesta debajo de la primera, obtendríamos un punto muy cercano al primero —siempre que nuestra partícula no hubiera sido absorbida por la primera placa—). Porque la partícula habrá sido frenada por la interacción con la placa.

3) Por lo que concierne a la información retrodictiva, afirmo que tenemos que aceptar la opinión de que la trayectoria de la partícula puede seguirse en sentido contrario hasta la ranura. Se recordará (véase *L.I.C.*, sección 75, texto de las notas 5 y 6) que Heisenberg sugiere que este cálculo de la trayectoria pasada de la partícula tiene una condición dudosa y que es «cuestión de gustos» el atribuirle o no una significación física. (Schlick y otros declararon que el conocimiento retrodictivo era «carente de sentido».)

Yo soy de una opinión diferente. Las relaciones de dispersión predicen, hemos visto, que la dispersión del momento aumenta con el estrechamiento de la ranura. *Por tanto, tenemos que contrastar la dispersión inmediatamente* (en nuestra figura, más adelante) *después de la ranura.* Sólo podemos hacerlo siguiendo la trayectoria de la partícula en sentido contrario, hacia la ranura. Esto muestra que los cálculos retrodictivos que permite el formalismo no son superfluos, sino necesarios para constratar la afirmación hecha sobre las relaciones de dispersión.

La situación, como de costumbre, se asemeja a una tirada de monedas. La teoría de una máquina de tirar monedas puede decirnos que las propensiones a que salgan caras o cruces son iguales al ser tirada la moneda por la máquina. Para contrastar esa afirmación, tenemos que observar los resultados de varias tiradas. Esas observaciones sólo

nos proporcionan un conocimiento retrodictivo. No dan lugar a una predicción sobre ulteriores aventuras de la moneda —excepto a la predicción, algo trivial, de que si miro de nuevo a la misma moneda, veré que sigue mostrando cara— exactamente de la misma manera que una segunda placa o película fotográfica bajo la primera confirmará la medición de la posición de la partícula efectuada por la primera placa [2].

17. EL EXPERIMENTO DE EINSTEIN, PODOLSKY Y ROSEN

Tenemos, pues, que atribuir un significado físico y una relevancia a los cálculos retrodictivos que nos permiten determinar la posición *y* el momento de la partícula. Esto tiene la siguiente consecuencia clara: la partícula *tiene* siempre posición y momento; y la teoría no los predice exactamente porque es una *teoría probabilista* que sólo nos informa de las propensiones a tomar varias posiciones si el momento es dado y de las propensiones a tomar varios momentos si la posición es dada. (Si se seleccionan los de ojos azules o los de ojos castaños, etc., se obtienen las diversas distribuciones del color del pelo. Del mismo modo, si se hace la selección según el color del pelo, se obtienen las diversas distribuciones del color de los ojos. ¿Se puede seleccionar según las dos cosas? Naturalmente, pero entonces no hay lugar para ninguna teoría estadística o propensivista predictiva que relacione una propiedad con la otra. Todo el misterio cuántico no es mucho más misterioso que eso.)

Desde este punto de vista, no cabe duda de que la partícula *tiene* posición y momento y de que podemos incluso conocerlo, aunque sólo retrospectivamente, porque la teoría —que es una teoría propensivista como la de tirar monedas— sólo se ocupa de predicciones estadísticas o propensivistas.

En *L.I.C.*, sección 77, para mostrar que las partículas tienen realmente posición y momento, introduje un experimento. Ese experimento resultó ser insostenible.

Poco después, sin embargo, Einstein, Podolsky y Rosen publicaron un experimento que también se proponía mostrar que debemos atribuir a las partículas tanto posiciones como momentos, *según la teoría* —en total oposición a la interpretación de Copenhague [3].

---

[2] Compárese la discusión de Heitler en las secciones 7-9, *supra*.

[3] *Cf.* A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, *Physical Review*, serie 2, 47, 1935, pp. 777 y ss. [Véase más sobre la discusión de Popper del experimento de Einstein, Podolsky y Rosen en «Particle Annihilation and the Argument of Einstein, Podolsky and Rosen», *op. cit.* Este artículo contiene algunos puntos y argumentos que Popper ya no sostiene. Pero véase la sección I del «Prefacio de 1982» al presente volumen. *Ed.*]

Este experimento imaginario (del que Einstein tuvo la amabilidad de informarme por carta [4]) fue, enseguida, severamente criticado por Bohr [5]. Pero la réplica de Bohr, en mi opinión, no es válida. Esta fue, también, la opinión de Einstein hasta el final.

La idea de Einstein, Podolsky y Rosen es muy sencilla. Podemos dejar que dos partículas *A* y *B* entren en colisión. *A* se aleja. *B* puede ser observada y medida. Podemos escoger arbitrariamente medir la posición de *B* o su momento. Si decidimos medir la posición de *B,* podremos entonces calcular la posición de la lejana *A*. Si decidimos medir el momento de *B,* podremos entonces calcular el momento de la lejana *A*.

Así, *A* tiene que tener posición y momento, aunque la teoría no nos permita calcular los dos predictivamente al mismo tiempo. Este precioso y sencillo argumento me parece concluyente.

También tiene consecuencias de largo alcance. Según la concepción ortodoxa, la partícula mecánico-cuántica se distingue de las partículas más corrientes o «clásicas» precisamente por el hecho de que carece de sentido atribuirle posición y momento al mismo tiempo. No tenemos que tratar seriamente de visualizar una partícula de este tipo, pero la partícula se comporta como si su momento fuese a hacerse «borroso» en un recorrido considerable, en el momento en que ella «toma» una posición definida; y viceversa, como si la posición fuese a hacerse «borrosa» cuando «toma» un momento definido. El «tomar» es una especie de reacción, estimulada por la *interferencia* con la partícula, es decir, por el hecho de someterla a un experimento de medición.

Esta interpretación del formalismo me parece refutada por las ideas de Einstein, Podolsky y Rosen. *Porque no hay interferencia con la partícula A,* que, de hecho, puede estar muy lejos en el momento en que interferimos con *B* al medir su posición o su momento.

Aunque este claro y simple experimento es decisivo, no ha sido aceptado como tal. Yo creo que la razón de su rechazo es, sencillamente, la autoridad de Bohr, no un argumento contrario. Porque, en contraste con las sencillas y claras ideas de Einstein, el argumento que le opone Bohr es muy difícil de entender. Eintein no lo entendió nunca (según me dijo) y yo no he conocido a ningún físico capaz de presentarlo en nada parecido a una forma clara y simple. Creo que he conseguido entender lo esencial de él, pero no estoy del todo seguro.

Tal como yo lo entiendo, el argumento que opone Bohr es éste: Cuando nos decidimos (después de que *A* se haya alejado) sobre si mediremos la posición de *B* o su momento, entonces nos comprometemos a elegir entre dos disposiciones experimentales diferentes: para

[4] Esta carta contiene una versión concisa y, en mi opinión, perfeccionada, del argumento. Está impresa en *L.I.C.,* Apéndice *xii.

[5] N. Bohr, *Physical Review,* ser. 2., 48, 1935, pp. 696 y ss.

expresarlo con sencillez, tenemos que escoger entre un marco experimental que nos permita relacionar a *B* con un *espacio de posición* y otro marco experimental que nos permita relacionar a *B* con un *espacio de momentos*. Las dos disposiciones experimentales equivalen a establecer dos sistemas diferentes de coordenadas. Las disposiciones experimentales se excluyen mutuamente (es decir, son «complementarias»), continúa el argumento, y, por tanto, no podemos combinar los dos espacios o los dos sistemas de coordenadas en uno. (Bohr se detiene en esta exclusividad o «complementariedad», cosa bastante rara, porque estaba claro que no era esa la cuestión, ya que sus oponentes *aceptaban* el supuesto de que debemos *escoger* entre medir la posición o el momento de *B* y que no podemos medir los dos a la vez.) En consecuencia, encontramos que si escogemos el marco de posiciones, *A* se relaciona (indirectamente, por medio de *B*) con ese marco; y si escogemos el marco de momentos, *A* se relaciona con este marco. La conclusión es que *A* no puede relacionarse con las dos coordenadas al mismo tiempo, de modo que carece de sentido (si yo entiendo bien) atribuir a *A* un momento si no está en relación con el marco de momentos o una posición si no está en relación con el marco de posiciones.

Este es el máximo partido que puedo sacar del argumento de Bohr. No afirmo, en absoluto, que esto sea lo que él quería decir. Mi crítica, que viene a continuación, no está, por tanto, dirigida hacia Bohr, sino solamente hacia mi propia versión de su réplica a Einstein, Podolsky y Rosen.

Mi crítica consta de dos partes. Primero, la respuesta a Einstein y sus colaboradores consiste en un cambio subrepticio de la teoría que Einstein atacaba, en un cambio de terreno. Antes del cambio, nos decían que la partícula reaccionaba a las mediciones tomando un valor nítido para una variable y haciéndose borrosa para la otra. Pero ahora nos dicen que lo que querían decir era algo completamente distinto y mucho más inocuo. Era solamente que, unas veces, es aplicable un sistema de coordenadas y otras, otro, pero nunca los dos al mismo tiempo. Esto deja completamente pendiente la cuestión de qué hace la propia partícula. La sugerencia de que *carece de sentido* hablar de posición o de momento, a menos que podamos relacionar a la partícula con el sistema correspondiente de coordenadas es tan gratuita como la afirmación de que carece de sentido llamar rico a un hombre a menos que pague el impuesto sobre la renta.

La segunda parte de mi crítica es que la réplica a Einstein y sus colaboradores yerra el tiro. El argumento principal no era ni que las fórmulas de indeterminación no fueran válidas ni que la teoría cuántica fuera inconsistente (ni siquiera que fuera incompleta, aunque Einstein dijo que lo era). El argumento principal era la simple cuestión de que si yo puedo decidir libremente —y si puedo realizar con éxito

mi decisión *sin interferir con usted*— medir su talla o su peso, entonces es insensato decir que usted no tiene talla y peso al mismo tiempo, sino que toma una u otro, adaptándose al estímulo de la medición.

De sensatez era de lo que se trataba. La cuestión no es si por medio de un sutil y altamente escolástico argumento podemos continuar defendiendo una posición insostenible. La cuestión es si debemos pensar racionalmente y con espíritu crítico en física o estar a la defensiva y en actitud apologética. (Siempre puede uno escapar a las refutaciones por medio de una estratagema formalista o por medios similares. *Cf. L.I.C.,* secciones 19 y ss.).

Antes de dejar el experimento de Einstein, Podolsky y Rosen, quiero indicar por qué dudo que la llamada teoría de las ondas piloto de De Broglie, redescubierta por David Bohm, sea aceptable. Lo dudo a causa de la réplica de Bohm a Einstein, Podolsky y Rosen [6]. Bohm no acepta la concepción de que las partículas tengan tanto posiciones como momentos nítidos, sino que interpreta la teoría y, sobre todo, las relaciones de indeterminación, de tal forma que no puede aceptar la sencilla conclusión que hemos formulado aquí. En cambio, afirma que al medir la posición de *B,* perturbamos a *A* —con velocidad superior a la de la luz—. Así, si medimos la posición de *B,* interferimos con *B* y también con *A,* por mucho que se haya alejado. Estoy de acuerdo con Einstein en que no hay nada que acredite tal sugerencia. Y debo decir lo mismo a propósito de una réplica posterior de Bohm a Einstein [7]. La última observación de Bohm en ese artículo merece ser citada. Dice que él «admite sólo dos razones válidas para descartar una teoría que explique una amplia gama de fenómenos. Una es que la teoría carezca de consistencia interna y la otra que no concuerde con los experimentos». En contra de esto hay que señalar: primero, que Einstein nunca sugirió que se descartase la teoría cuántica; no hizo más que discutir hasta qué punto eran aceptables las diversas interpretaciones rivales. Segundo, puede haber razones válidas para criticar una teoría, diferentes de las enunciadas por Bohm. (Una teoría puede no ser claramente refutada; pero puede fallar en una u otra cosa, como en la explicación de la carga electrónica o de la transición de las partículas; o puede, quizá, explicar los fenómenos de una manera menos satisfactoria que otra teoría.)

[6] En D. Bohm, *Physical Review,* 85, 1951, pp. 166 y ss. y 180 y ss.

[7] *Cf.* D. Bohm, en *Scientific Papers Presented to Max Born,* 1953. La cita es de p. 18. [Pero véase ahora la nueva discusión de Popper en el «Prefacio de 1982», en este volumen. *Ed.*]

18. EL EXPERIMENTO DE LAS DOS RANURAS

Quiero discutir aquí un tipo de experimento, debido a Young, que creo yo, está en la raíz de todo el problema. Lo ha discutido Bohr una y otra vez, y, sin duda, le ha impresionado profundamente. En realidad, yo creo que no puede entenderse sin dificultad excepto, quizá, en términos de la interpretación propensivista [8].

La disposición del experimento consiste en una fuente de luz (o de electrones); una primera pantalla con una estrecha ranura, para asegurar que nuestra fuente es lo más pequeña posible; una pantalla con dos ranuras que dejan pasar la luz y una tercera pantalla (o placa fotográfica) en la que observamos las franjas de interferencia, de acuerdo con la teoría ondulatoria de la luz *(Cf.* fig. 5).

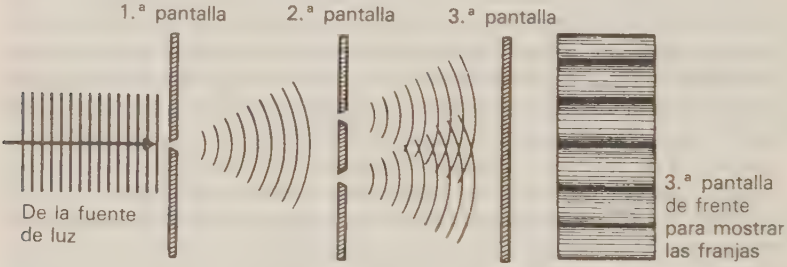

FIGURA 5

El principal problema es éste: Si amortiguamos la fuente de luz hasta que sólo emita un cuanto (una partícula) en un experimento, y repetimos este experimento una vez al día, y superponemos los resultados de muchas repeticiones, seguiremos obteniendo franjas de interferencia (o eso suponemos). Esas franjas cambian si cerramos una de las dos ranuras: si abrimos sólo la ranura superior durante un tiempo, el resultado obtenido diferirá bastante del que se obtiene si las dos ranuras están abiertas al mismo tiempo. Así, las dos ranuras «cooperan» en producir las franjas o en determinar la probabilidad de que la partícula alcance un punto en la segunda pantalla en vez de otro. (Esta cooperación puede entenderse con ayuda del principio de Huygens.) Pero cada una de las partículas no puede pasar nada más que por *una* de las ranuras. ¿Cómo puede ser influenciada por el hecho de que la otra esté abierta (o cerrada)?

Desde el punto de vista de la interpretación propensivista, la res-

[8] Discutí el experimento en el apéndice v del *L.I.C.*, pero allí sólo pude abordarlo desde una «reinterpretación estadística», que, sin embargo, no carece de interés.

puesta a esta pregunta es sencilla: *es la totalidad de la disposición experimental la que determina las propensiones.* Los resultados posibles de cualquier experimento singular son claramente diferentes en el caso de que las dos ranuras estén abiertas y en el caso de que sólo una lo esté. Pero las propensiones dependen, como sabemos, de las posibilidades. Podemos entender bien, por tanto, el hecho de que los resultados difieran. La diferencia se sigue de la teoría matemática —del carácter de ecuaciones de ondas de las ecuaciones que determinan las propensiones.

Así, la partícula pasará a través de una sola ranura y, en cierto sentido, permanecerá imperturbada por la otra ranura. En lo que influye la otra ranura es en las propensiones de la partícula relativas a toda la disposición experimental, no a la partícula en sí: las propensiones a alcanzar uno u otro punto en la segunda pantalla.

La situación es similar a la de un conocido juego de azar (tablero de clavijas, billar romano): Unas bolas pequeñas ruedan por un tablero inclinado golpeando unas clavijas y pasando a la derecha o a la izquierda de cada clavija. Si una bola rueda hacia abajo, habrá muchas clavijas que no toque nunca. No influyen en la bola. Pero influyen en las propensiones inherentes a la disposición experimental: las propensiones variarían si esas clavijas se cambiasen de lugar o se quitasen. Y al repetir frecuentemente el experimento, los resultados estadísticos cambiarían con las propensiones cambiadas [9].

Esta es nuestra respuesta fundamental. Para entenderla plenamente, tomamos cualquier otra disposición que nos permita averiguar a través de cuál de las dos ranuras pasa la partícula. (Por ejemplo, un rayo de luz que nos permita «ver» o fotografiar un electrón cuando emerge de una ranura o cuando entra en ella.) Cualquier disposición de esa índole cambiará el experimento; y al calcular el experimento veremos que el cambio elimina las franjas. (Esto lo sabemos porque la teoría entraña las relaciones de Heisenberg.) Interpretamos esto en el sentido de que las propensiones —que dependen de la disposición experimental— han cambiado. Ni siquiera necesitamos preguntar si el cambio se debe a una interferencia con el electrón (como en el caso del rayo de luz que bordea las ranuras) o sólo a una interferencia con las posibilidades, es decir, las propias propensiones (como en el caso

[9] [Véase el desarrollo de esta discusión que Popper realiza en «Quantum Mechanics without the "Observer"», *op. cit.*, pp. 33-6, reimpresa como la Introducción al presente volumen. Sólo conozco una tentativa de refutar este análisis de Popper: la de Paul Feyerabend, «On a Recent Critique of Complementarity», en *Philosophy of Science,* 35, pp. 309-331; y 36, pp. 82-105. He mostrado que la crítica de Feyerabend carece de valor en mi «Critical Study: The Philosophy of Karl Popper, Part II: Consciousness and Physics», *Philosophia,* 7, julio 1978, pp. 694-695. Véase también mi discusión en la Introducción, más arriba, nota 65. *Ed.*].

de que se cierre una ranura): todo lo que necesitamos saber para todos esos casos es que la ecuación de ondas que nos permite determinar las propensiones entraña las relaciones de dispersión de Heisenberg, y que éstas limitan las predicciones posibles.

Así, no veo ninguna dificultad aquí ni ningún problema que estén relacionados específicamente con la teoría cuántica —es decir, con la constante *h* de Planck—. Nos enfrentamos, más bien, con un problema que reaparece en varias teorías probabilistas, por ejemplo, en la teoría de la difusión.

En relación con el experimento de las dos ranuras, puede plantearse la siguiente dificultad. Consideremos un fotón que venga de muy lejos y se acerque a una de las dos ranuras. ¿Se verán afectadas sus propensiones si, mientras se acerca, la otra ranura es cerrada o abierta?

La respuesta correcta a esta pregunta es que está mal formulada porque no hay disposición experimental que corresponda a esa pregunta. Porque la única manera de controlar el acercamiento del fotón hacia una de las dos ranuras equivaldría a una reorganización del experimento que sería fundamentalmente similar a cerrar la otra ranura. Así pues, la pregunta no puede ser respondida, al menos dentro de nuestra teoría [10].

No deja de tener interés dilucidar esta respuesta con ayuda de nuestra disposición del billar romano. Aquí, una cierta clavija *P* puede quitarse sin afectar a las propensiones una vez que la bola ha pasado por el último lugar desde el cual puede llegarse a *P*. Esto podría sugerir la siguiente respuesta a la pregunta que acabamos de desechar: una vez que el fotón ha pasado a un punto desde el cual la luz no puede llegar a la segunda ranura, abrirla o cerrarla no tendrá ya ninguna influencia sobre las propensiones. Pero una respuesta así sería errónea. En el caso del billar romano, es concebible que la disposición experimental —y, por tanto, las propensiones— no sea afectada de ningún modo significativo si estamos atentos y quitamos la clavija *P* cuando hayamos visto pasar a la bola por el último lugar desde el que se puede llegar a *P*. No obstante, tenemos que darnos cuenta de que, incluso en ese caso, hay dos disposiciones experimentales totalmente diferentes: una que incluye la eliminación de *P* y otra que no la incluye. Que esos dos experimentos diferentes pueden determinar unas propensiones equivalentes es perfectamente posible, pero si lo hacen o no de hecho dependerá de los detalles de las disposiciones experimentales. (Por ejemplo, la supresión de una clavija puede generar una vibración en la mesa que puede influenciar las propensiones.) En el ca-

[10] [*(Añadido en 1981.) Este es otro lugar donde mis palabras pueden ser mal interpretadas como implicando que las propensiones son relativas solamente a las disposiciones experimentales, en vez de a la situación física. Véase la n. 63 a la Introducción de este tomo.]

so del experimento de las dos ranuras, la teoría nos dice que cualquier disposición que nos permita averiguar que la partícula (fotón, electrón, etc.) ha pasado por un cierto lugar, cambiará inevitablemente la disposición experimental, de tal manera que con ello cambiarán las propensiones.

Estas consideraciones conciernen, en cierto modo, al famoso principio de complementariedad de Bohr. Detrás de dicho principio no hay, mucho me temo, nada más que esto: que las distintas disposiciones experimentales son siempre distintas; y que dos disposiciones experimentales cualesquiera, por muy iguales que sean, siempre se excluyen mutuamente, en el sentido de que nunca pueden darse juntas. Porque cualquier intento de combinarlas creará una nueva disposición experimental. El modo en que resultan afectadas las propensiones por dicho cambio es algo que la teoría tiene que decidir.

Es equivocado sugerir que los experimentos concebidos para medir la posición excluyen a los experimentos concebidos para medir el momento (o que son «complementarios» de ellos), mientras que dos experimentos concebidos para medir la posición no se excluyen mutuamente y producen siempre el mismo resultado. La verdad es que tampoco pueden combinarse dos experimentos para medir la posición sin producir un tercer experimento —un experimento en el que la posición se mide dos veces sucesivas—. Y lo que la teoría nos dice es que (puesto que la partícula «tiene» una posición) esos dos experimentos, si se realizan correctamente, darán lugar a resultados compatibles. Del mismo modo, la concepción de que las mediciones de posición y momento no pueden combinarse en el mismo experimento es también equivocada: porque, como hemos visto, todas las mal llamadas mediciones de momento son en realidad interpretaciones teóricas de alto nivel de lo que es, en un nivel de interpretación algo más bajo, una medición de la posición. *(Cf.* sección 15.)

Esto queda claro cuando consideramos la disposición adoptada por el propio Bohr para medir el momento por medio de balanzas de resorte. *(Cf.* el libro de Schilpp sobre Einstein, *op. cit.*, pp. 220, 227.) Siempre que usamos la balanza de resorte, tenemos que leer dos *posiciones* del marcador (o la diferencia entre dos posiciones).

Un número considerable de experimentos tienen que tratarse del mismo modo que el experimento de las dos ranuras. Uno famoso es el de un espejo semi-reflectante que se coloca en el trayecto de un fotón. Los dos «haces» divididos pueden volver a reflejarse e interferir, produciendo franjas. Así, puede argüirse que el fotón tiene que haber estado en los dos semi-haces; pero si interceptamos los dos semihaces con placas fotográficas, encontraremos (según la teoría) que el fotón sigue indiviso y que está en uno u otro de los dos semi-haces.

La explicación de esta contradicción aparente es, naturalmente, que el *fotón* está siempre indiviso en uno u otro de los semi-haces, y que las propensiones pueden calcularse por medio de la teoría, que nos dice que se comportan como trenes de ondas (o «haces») que pueden dividirse y pueden interferir a continuación.

El famoso ejemplo de Dirac de polarización por una turmalina pertenece también a esta categoría de experimentos. No hay razón alguna para suponer (como sugiere Dirac) que el fotón único está en los dos estados, diferentes e incompatibles, al mismo tiempo, de la misma manera que no suponemos que pasa por las dos ranuras al mismo tiempo. Hay diferentes posibilidades, diferentes estados virtuales, inherentes al experimento; y esas diferentes posibilidades son ponderadas o medidas por las propensiones.

19. UNA DISCULPA POR HABER SIDO POLEMICO

Quiero explicar en esta sección final, los motivos que me han impulsado a criticar a algunos físicos por los que siento la mayor admiración.

Se ha planteado una situación muy grave. La atmósfera general antirracionalista que se ha convertido en la mayor amenaza de nuestro tiempo y que todo pensador a quien le preocupen las tradiciones de nuestra civilización tiene el deber de combatir, ha llevado a un grave deterioro de las normas del debate científico. Todo está relacionado con las dificultades de la teoría —o, quizá, no tanto con esas dificultades en sí como con las de las nuevas técnicas que amenazan absorber la teoría—. El deterioro empezó con los brillantes científicos jóvenes que se vanagloriaban de su dominio de los instrumentos y nos miraban con desdén a los aficionados que teníamos que hacer un esfuerzo para comprender lo que hacían y decían. Esta actitud se convirtió en amenaza cuando se endureció hasta convertirse en una especie de ceremonial profesional.

Pero los más grandes entre los físicos contemporáneos no adoptaron nunca tal actitud. Esto es cierto respecto a Einstein y Schrödinger y también respecto a Bohr. Nunca se vanagloriaron de su formalismo, sino que continuaron siempre su búsqueda, demasiado conscientes de la inmensidad de su ignorancia.

¿Por qué se ha respondido siempre a Schrödinger con argumentos que no pueden tomarse en serio en ningún momento? Creo que la razón es que sus distinguidos críticos ya no se toman en serio la discusión. Si Schrödinger les hubiese sorprendido nuevamente con otro formalismo, hubiesen vuelto a escucharle con la mayor atención. Pero las *meras palabras* ya no les interesan a nuestros especialistas; ni siquiera si provienen de un hombre que ha hecho por su disciplina, como mínimo, tanto como cualquier otro. Si un gran físico como Schrödinger recibe ese trato —y a Einstein le trataron igual de mal—,

¿qué puede esperar un simple aficionado como yo, si se atreve a disentir de los profesionales?

Es, en parte, en un intento de clarificar la situación y, en parte, en un intento de mostrar que debemos devolver a la discusión racional normal el lugar que debe ocupar por derecho propio, por lo que he entrado en los detalles de la polémica iniciada por Schrödinger [11].

Admiro a todo el que tiene la capacidad de ayudar en la gran tarea del descubrimiento. Pero no me impresiona el especialista —el experto— como tal. No debemos permitir que nos arrollen con fórmulas imponentes: ése es el camino de la perdición. La admiración hacia el experto impenetrable supone dar mayor importancia a la mera dificultad de expresión y nos tienta a confundir la oscuridad con la profundidad. Debemos insistir en la claridad de pensamiento, en la simplicidad y en la responsabilidad intelectual cuando se discuten temas que, después de todo, deberían preocupar a todo el mundo.

Cuando investigué, recientemente, la controversia sobre Boltzmann [12], llegué a la conclusión de que nuestras normas de discusión racional se habían deteriorado gravemente desde entonces. El declive empezó con la primera guerra mundial y con la aparición de la actitud tecnológica e instrumentalista con respecto a la ciencia. Pero se agravó mucho con el aumento del prestigio de la pura dificultad. Es responsabilidad nuestra parar esta evolución y volver a los principios tradicionales de inteligibilidad y simplicidad.

Una vez dicho todo esto sobre el motivo de mi tono polémico, quiero dejar claro que hay otro más. Es mi admiración sin límites por la obra de Einstein y de Schrödinger.

No es que yo crea que criticar a Einstein y a Schrödinger sea un crimen de lesa majestad; después de todo, yo mismo he criticado el determinismo de Einstein y su intermitente inclinación, y la de Schrödinger, hacia una teoría subjetiva de la probabilidad, y también he criticado, en parte, la teoría de partículas de Schrödinger. Pero tengo la impresión de que, en la forma en que han sido criticados a veces, hay síntomas de falta de aprecio.

Sobre Einstein, no necesito decir lo que cualquiera que tenga algún conocimiento de la historia del pensamiento humano no puede dejar de comprender: que quizá no haya otro hombre, desde Galileo, Kepler y Newton, que haya hecho tanto por abrir nuestras mentes.

---

[11] No quiero exaltar a Schrödinger como una autoridad que esté por encima de las críticas. Por el contrario, soy muy crítico de gran parte de lo que ha escrito: de su determinismo, sus intentos de argüir en favor de una interpretación subjetiva de la probabilidad y, sobre todo, de su teoría de la Flecha del Tiempo y su conexión con la Segunda Ley de la Termodinámica. [Véase la discusión de Popper sobre Schrödinger en *Búsqueda sin término (U. Q.*, 1976), sección 30. *Ed.*]

[12] [Véase la discusión de Popper sobre Boltzmann en *Búsqueda sin término (U. Q.*, 1976), sección 35. *Ed.*].

Respecto a Schrödinger, muchos de los físicos de la nueva generación le conocen, sobre todo a través de los libros de texto, como el famoso autor de la ecuación de ondas. Es una lástima. Porque los *Collected Papers on Wave Mechanics,* de Schrödinger, son una obra clásica. Creo que son únicos. Lo directo del enfoque de Schrödinger, la profundidad y la enorme belleza de sus ideas, la lucidez de su presentación, su extraordinaria falta de apego y su ironía para consigo mismo, el hecho de que busque refutación y la encuentre: todo ello es un maravilloso documento humano, una obra de arte, una aventura de ideas que pocos han igualado.

Y es *física* de primera categoría. Schrödinger no sólo es el padre real del *formalismo* de la teoría cuántica; es, antes de nada, un físico que trata de entender el mundo físico en que vivimos. Es, como Einstein, un auténtico heredero de las especulaciones de Faraday y ha sido el primero en mostrarnos que algún día podrá explicarse la materia como una perturbación de algo que, a su vez, no es material.

No creo que haya ninguna posibilidad de que este algo resulte ser «una especie de mente» o algo «espiritual» como tratan de vislumbrar algunos defensores de lo espiritual. Tampoco creo que la mente humana ni el espíritu humano necesiten defensores; ni que podamos anticipar sus aventuras y descubrimientos futuros.

Y, en cuanto a los grandes fundadores de la nueva teoría de la materia —desde Planck, Einstein, Bohr y De Broglie hasta Schrödinger, Pauli, Born, Heisenberg y Dirac— permítaseme aplicarles las palabras de un maestro: «No puedo expresar con fuerza bastante mi ilimitada admiración hacia la grandeza de espíritu de aquellos hombres», escribió Galileo de los fundadores del sistema heliocéntrico, «que lo concibieron y lo tuvieron por verdadero... en violenta oposicion contra la evidencia de sus propios sentidos».

UN EPILOGO METAFISICO

> Existe algo además de la extensión, incluso algo que es anterior a la extensión.
>
> LEIBNIZ [1]

El indeterminismo y la interpretación propensivista de la probabilidad nos permiten trazar una nueva imagen del mundo físico. Según esta imagen, de la que sólo puede darse aquí un esbozo muy aproximado, todas las propiedades del mundo físico son disposicionales, y el estado real de un sistema físico, en cualquier momento, puede concebirse como la suma total de sus disposiciones —o sus potencialidades o posibilidades o propensiones.

El cambio, según esta imagen, consiste en la realización o actualización de algunas de esas potencialidades. Esas realizaciones, a su vez, consisten, de nuevo, en disposiciones o potencialidades —potencialidades, no obstante, que difieren de aquéllas de las cuales ellas son la realización—. Esta perspectiva corresponde estrechamente a la concepción del mundo según el sentido común. Cuando un estudiante entra en la Universidad, hay una cierta posibilidad, inherente a esta situación, de que se presente a los exámenes finales; de que conteste a las preguntas de los exámenes con mayor o menor acierto; y de que obtenga un título. Cuando se presenta a los finales, está realizando la primera de esas posibilidades o potencialidades; y, al mismo tiempo, la nueva situación que ha surgido cambia las otras dos posibilidades. De hecho, el presentarse a los finales puede considerarse esencialmente como una posibilidad de responder a las preguntas, con mayor o menor acierto, y de obtener un título. Cuando ha entregado sus respuestas, y realizado así otro conjunto de posibilidades o potencialidades, se ha creado una nueva situación que vuelve a cambiar las potencialidades para la obtención de su título. Cuando finalmente obtiene el título, y realiza así algunas de sus potencialidades, entonces la nueva situación crea nuevas potencialidades relacionadas, por ejemplo, con que haga, o no, uso de su título en su profesión. Obtenemos así una imagen del mundo que es a la vez dualista

---

[1] «Est aliquid praeter extensionem imo extensione prius», citado por Kant en *Gedanken von der wahren Schätzung der lebendigen Kräfte und Beurteilung der Beweise,* 1746, final de la primera de las secciones principales, 1, en *Werke,* Ernest Cassirer ed., vol. I, p. 15.

y monista. Es dualista en el sentido de que las potencialidades lo son sólo en relación con sus realizaciones o actualizaciones posibles; y es monista en el sentido de que las realizaciones o actualizaciones no sólo determinan potencialidades, sino que ellas mismas pueden considerarse, incluso, como potencialidades. (Pero deberíamos evitar decir, quizá, que «no son más que» potencialidades.) Así pues, podemos describir el mundo físico como consistente en *cambiantes propensiones al cambio*. Aunque, en general, esas propensiones no determinan los cambios futuros, pueden determinar, en algunos campos de la física, al menos, las distribuciones de las probabilidades —que pueden incluir probabilidades iguales a 1— de los diversos cambios futuros que son posibles.

Este enfoque contiene la sugerencia de una teoría de la materia o de las partículas, según la cual éstas se interpretan como realizaciones de potencialidades o propensiones, y al mismo tiempo, como consistentes, a su vez, en potencialidades o propensiones.

Uno de los puntos principales de este enfoque es la sugerencia de que, de este modo, es posible ofrecer una reinterpretación indeterminista del programa determinista de Einstein y, al mismo tiempo, una reinterpretación objetivista y realista de la teoría cuántica. El objetivo es una imagen del mundo en la que haya lugar para los fenómenos biológicos, para la libertad humana y para la razón humana.

20. IDEAS Y PROGRAMAS METAFISICOS DE INVESTIGACION Y LA HISTORIA DE LA FISICA

Alguien debería escribir algún día la historia de la física como una historia de las situaciones de sus problemas. (A propósito, ésta es la forma en que debería escribirse toda historia, yo creo, incluida la historia política.) Las situaciones de los problemas, tal como afectan a la historia de la física (en contraposición a, por ejemplo, la historia política) pueden analizarse casi completamente en términos puramente lógicos, siempre que tengamos en cuenta las ideas metafísicas que contribuyen a la creación de problemas y que determinan, en gran medida, la dirección en la que buscamos soluciones [2].

En ciencia, las situaciones de los problemas son el resultado, por lo general, de tres factores. Uno es el descubrimiento de una inconsistencia en la teoría dominante. El segundo es el descubrimiento de una inconsistencia entre teoría y experimento —la refutación de la teoría por los experimentos—. El tercero, y quizá el más importante, es la

[2] [Véase Popper sobre las situaciones de los problemas y la escritura de la historia, en *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.*, 1963), pp. 66-96. *El yo y su cerebro* (S. & I. B., 1977), pp. 151 ss.; *Conocimiento objetivo (Obj. Kn.*, 1912), pp. 155-179. *Ed.*]

relación entre la teoría y lo que puede llamarse *«el programa metafísico de investigación»* [3].

Con el uso de este término quiero llamar la atención sobre el hecho de que en casi todas las fases del desarrollo de la ciencia estamos bajo el dominio de ideas metafísicas, es decir, incontrastables; ideas que determinan no sólo qué problemas explicativos decidiremos acometer, sino también qué tipos de respuestas consideraremos adecuadas o satisfactorias o aceptables, como perfeccionamiento o avance sobre respuestas anteriores.

Al plantear los problemas explicativos para cuya solución se concibe la teoría, el programa metafísico de investigación hace posible juzgar el acierto de la teoría como explicación. Por otro lado, la discusión crítica de la teoría y de sus resultados puede llevar a un cambio en el programa de investigación (normalmente se trata de un cambio inconsciente, puesto que con frecuencia el programa se tiene de manera inconsciente y se da por sentado), o a su sustitución por otro programa. Esos programas sólo se discuten como tales muy de vez en cuando: con mayor frecuencia están implícitos en las teorías, en las actitudes y en los juicios de los científicos.

Llamo «metafísicos» a esos programas también porque son el resultado de concepciones generales sobre la estructura del mundo y, al mismo tiempo, de concepciones generales sobre la situación de los problemas en la cosmología física. Los llamo «programas de investigación» porque incorporan, junto con una perspectiva de cuáles son los problemas más urgentes, una idea general de cuál sería una solución satisfactoria a esos problemas *(cf. Realismo y el objetivo de la ciencia,* tomo I de este *Post Scriptum,* sección 15). Pueden describirse como *física especulativa* o quizá como anticipaciones especulativas de teorías físicas contrastables.

En esta sección empezaré dando, en un orden aproximadamente cronológico, una lista mínima de diez de los más importantes programas de investigación que han influido en la evolución de la física desde los días de Pitágoras y Heráclito; y sobre todo, desde Parménides, cuando el *problema del cambio* se convirtió en el problema fundamental de la metafísica y de la física [4].

Después de la lista, intentaré añadir, a modo de ilustración, un esquema de la sucesión de las situaciones de los problemas que llevaron del programa de Descartes al de Faraday.

---

[3] [*Cf.* La discusión de Popper de los programas metafísicos de investigación en *Búsqueda sin término* (*U. Q.*, 1976), sección 33; y en el «Prefacio de 1982» en este volumen. *Ed.*]

[4] *Cf.* mi artículo «La naturaleza de los problemas filosóficos», en *El desarrollo del conocimiento científico* [C. & R., 1963], pp. 80-115.

1. *El universo en bloque de Parménides.* La nada (el vacío, el espacio desocupado) no puede existir: el mundo está lleno, es un bloque. El movimiento y el cambio son imposibles. Una imagen verdadera del mundo tiene que ser racional, es decir, basada en la deducción y en el principio de no contradicción [5].

2. *Atomismo.* El movimiento y, por tanto, el cambio, son reales. Así, el mundo no puede estar lleno, el vacío tiene que existir. El mundo consiste en átomos y en vacío —en «lo lleno» y «lo vacío»—. *Todo cambio se explica por el movimiento de los átomos en el vacío.* No existe el cambio cualitativo —sólo movimiento y cambio estructural, es decir, reorganización—. El vacío es el espacio para los movimientos y posiciones posibles de los átomos.

3. *Geometrización.* Un antiguo programa pitagórico había sido la aritmetización de la cosmología (incluida la geometría); se vino abajo con el descubrimiento de los números irracionales. Platón dio la vuelta al programa; fue el primero que concibió la geometrización de la cosmología (incluida la aritmética). El mundo físico es espacio lleno de materia. La materia es espacio *formado* (o moldeado) y como la geometría es la teoría de las formas y del espacio, las propiedades fundamentales de la materia se explican geométricamente (en el *Timeo).* La geometrización del cosmos y de la aritmética es continuada por Eudoxo, Calippo y Euclides. (Euclides no pretendía escribir un texto de geometría sino resolver el problema de una teoría geométrica de los números irracionales y otros problemas fundamentales de la cosmología platónica [6].)

4. *Esencialismo y potencialismo.* Para Aristóteles, el espacio *(topos,* espacio de posición) es materia y la geometría pura pierde su lugar central que es tomado por un dualismo de materia y forma (o esencia). *La forma o esencia de una cosa es inherente a ella y contiene sus potencialidades.* Estas se realizan en razón de su causa *final,* el fin, el objetivo. (El bien es la autorrealización [7].)

5. *La física del Renacimiento* (Copérnico, Bruno, Kepler, Galileo, Descartes) es, en gran medida, una restauración de la cosmología

---

[5] [Véanse también las discusiones de Popper sobre Parménides en *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.,* 1963) y en *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977), *Ed.*]

[6] Véase mi artículo «La naturaleza de los problemas filosóficos», en *op. cit.* [Véase también «Retorno a los presocráticos», en *El desarrollo del conocimiento científico (C. & R.,* 1963), pp. 160-93. *Ed.*]

[7] [Véase la discusión de Popper sobre el esencialismo de Aristóteles en *La sociedad abierta y sus enemigos (O. S.,* 1945), capítulo 11. *Ed.*]

geométrica de Platón, de sus causas *antecedentes («universale ante rem»)* y de su método hipotético-deductivo. (Algo más tarde hay también una restauración del atomismo.) Resulta en:

6. *La teoría del mundo como reloj* (Hobbes, Descartes, Boyle). La esencia o forma de la materia es idéntica a su extensión espacial. (Esto es una combinación de ideas platónicas y aristotélicas [8].) Así pues, todas las teorías físicas tienen que ser geométricas. Toda causación física es empuje o, más en general, acción a una distancia decreciente. Todos los cambios cualitativos son movimientos cuantitativo-geométricos de la materia; por ejemplo, del flujo del calor (caloricos) o del magnetismo o de la electricidad. (Compárese también la conjetura de Bernoulli de que los átomos son vórtices del éter.)

7. *Dinamismo.* Toda causación física se explica o por el empuje o por fuerzas centrales de atracción (Newton). Todo *cambio* de un estado físico depende funcionalmente de otro *cambio.* (Principio de las ecuaciones diferenciales.) Según Leibniz, el empuje tiene que explicarse también por fuerzas —por fuerzas centrales de repulsión—, porque el empuje no puede explicarse más que si la materia es espacio *lleno de fuerzas (de repulsión).* Así pues, Leibniz tiene una teoría de la materia dinámica y estructural. (Kant y Boscovich continuaron el desarrollo de la teoría de fuerzas centrales [9].)

8. *Campos de fuerzas* (Faraday, Maxwell). No todas las fuerzas son fuerzas centrales. Existen campos cambiantes de fuerzas (fuerzas vectoriales) cuyos cambios locales dependen de cambios locales a distancias decrecientes. (Principio de las ecuaciones parciales diferenciales, combinando los principios de causalidad de Newton y de Descartes.) La materia —es decir, los átomos o las moléculas— pueden ser explicables en términos de campos de fuerzas o de perturbaciones de campos de fuerzas. *(Cf.* la teoría de Bernoulli, mencionada en el punto 6.)

9. *Teoría unificada de campos* (Riemann, Einstein, Schrödinger). Geometrización de los campos, tanto gravitatorios como electromagnéticos. La teoría de campos de la luz se generaliza en una teoría de campos de las partículas y, por tanto, de la materia. Se predice que la materia es destructible (con la confirmación de esta predicción, la

[8] [Véanse otras discusiones de Popper en «Philosophy and Physics», *Atti del XII Congresso Internazionale di Filosofia,* Venecia, 1958, 2, Florencia, 1960, pp. 367-74; y en *El yo y su cerebro* (*S. &. I. B.,* 1977), especialmente capítulos P1 y P5. *Ed.*]

[9] [Véanse otras discusiones de Popper en *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977, pp. 6, 117-96). *Ed.*]

cosmología que concibe el mundo como un reloj —es decir, el materialismo— resulta refutada) y que es inter-convertible con la radiación, es decir, con la energía de campos y, por tanto, con las propiedades geométricas del espacio. Sin embargo, a la concepción de la materia como perturbación (vibración) del campo, se opone:

10. *La interpretación estadística de la teoría cuántica* (Born). Desde la teoría de los fotones de Einstein resulta dudoso que incluso la luz no sea más que una perturbación maxwelliana, una vibración del campo. Porque con cada tren de vibraciones (ondas luminosas) se asocia una entidad corpuscular, un fotón, que es emitido por un átomo y absorbido por otro átomo. Según De Broglie, existe un dualismo similar entre onda y partícula para las partículas de materia. Ahora bien, este dualismo es interpretado por Born de un modo que puede describirse casi como una reversión al atomismo en su sentido original: lo que existe son corpúsculos o partículas; y el campo y su vibración representan simplemente los instrumentos matemáticos de una física de partículas, indeterminista, y por medio de dichos instrumentos podemos calcular la probabilidad, puramente estadística, de encontrar una partícula en un estado determinado. Esta concepción (con la que yo estaba en gran parte de acuerdo en *L.I.C.*, 1934) parece ser incompatible con el programa de una teoría de campos, unificada y monista, de la materia; y lo que parece ser la mayoría de los físicos toma el éxito de la teoría cuántica estadística como indicación de que hay que abandonar el programa de Faraday, Einstein y Schrödinger de una teoría de campos de la materia [10].

Este breve repaso puede ayudarnos a entender los problemas fundamentales de la cosmología física y por qué son fundamentales. Estoy pensando en problemas tales como el problema del cambio en general; de la materia y el espacio (de los átomos y el vacío); de la estructura espacial del universo; de la causación (de acción a distancia o a distancias decrecientes; de fuerzas y de campos de fuerzas); de la estructura (atómica) de la materia y especialmente de su estabilidad y de los límites de su estabilidad; y de la interacción entre materia y luz.

Es interesante advertir que, hasta el momento, sólo ha habido tres teorías del cambio: el atomismo, que explica los cambios cualitativos

[10] Heisenberg expresó esta concepción con mucha claridad en «Der Begriff "Abgeschlossene Theorie" in der modernen Naturwissenschaft», *Dialectica*, 2, 1948, pp. 334-36. Yo critiqué esta concepción brevemente en mi artículo «Tres concepciones sobre el conocimiento humano», rempreso en *El desarrollo del conocimiento científico* (*C. & R.*, 1963), pp. 116-141. Más tarde, Heisenberg cambió de opinión. [Véanse los capítulos precedentes de este tomo del *Post Scriptum*. *Ed.*]

por movimientos cuantitativos de la materia; la teoría aristotélica de las potencialidades y su actualización o realización, que es una teoría cualitativa, y la teoría de las perturbaciones (vibraciones, ondas) de campos —como el atomismo, una teoría que aspira a explicar cuantitativamente los cambios cualitativos, pero por medio de intensidades cambiantes, en lugar de hacerlo por el movimiento de la materia extensa—. [*(Añadido en 1981.) Heráclito, creo, propuso sólo un programa; y la teoría de Parménides era una de no-cambio.]

Los programas de investigación de este tipo son, en general, indispensables para la ciencia, aunque tengan el carácter de la física metafísica o especulativa y no el de la física científica. Originariamente, todos ellos eran metafísicos, prácticamente en todos los sentidos de la palabra (aunque con el tiempo, algunos de ellos se hicieron científicos); eran vastas generalizaciones, basadas en diversas ideas intuitivas, muchas de las cuales nos parecen ahora equivocadas. Eran imágenes unificadas del mundo —el mundo real—. Eran sumanente especulativas; y eran, originariamente, incontrastables. En realidad, puede decirse que todas ellas tuvieron más el carácter de los mitos o de los sueños que el de la ciencia. Pero contribuyeron a dar a la ciencia sus problemas, sus propósitos y su inspiración.

Una ilustración, aunque sea un simple esbozo, puede resultar útil y, por tanto, concluiré esta sección dando un esquema de la historia de la situación de un problema concreto: la situación del problema de la materia desde Descartes. (Es parte de la historia de la transición de la teoría del mundo como reloj al dinamismo, es decir, del programa 6 al 7.)

La historia del problema de la materia ya ha sido esbozada notablemente por Maxwell (en su magnífico artículo «Atom», en la novena edición, 1875, de la *Encyclopaedia Britannica).* Pero aunque Maxwell dio un bosquejo de la historia de las ideas pertinentes, físicas y filosóficas, no dio la *historia de la situación del problema y de cómo cambió esa situación bajo el impacto de las soluciones intentadas.* Esta es la laguna que quiero llenar aquí [11].

Descartes basó la totalidad de su física en una definición esencialista o aristotélica de cuerpo o materia: un cuerpo es, en su esencia o sustancia, extenso, y la materia es, en su esencia o sustancia, extensión. (Así la materia es sustancia extensa por oposición a la mente que, como sustancia pensante o sensible, es en esencia, *intensidad.)* Como todo cuerpo o materia es extensión, toda extensión, todo espacio, es cuerpo o materia: el mundo está lleno, no hay vacío. Esta es la teoría de Parménides tal como la entendió Descartes. Pero, mien-

[11] Durante muchos años tuve la costumbre de dar un guión de esta historia en mis conferencias. [Véase Popper, «Filosofía y física», *op. cit.*, y *El yo y su cerebro* (*S. & I. B.*, 1977), esp. capítulos P1, P3 y P5. *Ed.*]

tras Parménides concluyó que no puede haber movimiento en un mundo lleno, Descartes aceptó una concepción cuyo origen puede remontarse a una sugerencia de Platón en *Timeo*, según la cual el movimiento es tan posible en un mundo llenc como en un cubo de agua; las cosas pueden moverse en un mundo lleno al empujarse unas a otras circularmente, en vórtices (o torbellinos); pueden moverse como las hojas en una taza de té.

En este mundo cartesiano, toda causación es acción por contacto: es empuje. En un *plenum*, un cuerpo extenso sólo puede moverse *empujando* a otros cuerpos. Todo cambio físico debe ser explicable en términos de mecanismos de relojería (o vórtices) en los que las diversas partes en movimiento se *empujan* unas a otras. *El empuje es principio de la explicación mecánica.* No puede haber acción a distancia. (Debo mencionar, entre paréntesis, que el propio Newton consideraba la idea de acción a distancia como absurda, unas veces, y como un fenómeno sobrenatural, otras.)

Este sistema cartesiano de mecánica especulativa fue criticado por Leibniz con argumentos puramente especulativos. Leibniz aceptaba la ecuación cartesiana fundamental, *cuerpo = extensión*. Pero, mientras Descartes creía que esta ecuación era primaria e irreducible, evidente, clara y distinta, Leibniz ponía en duda todo ello: si un cuerpo empuja a otro hacia adelante, en lugar de penetrarlo, esto sólo puede ocurrir porque los dos *resisten a la penetración*. Esta resistencia es *esencial* a la materia o cuerpo; porque permite a la materia o cuerpo llenar el espacio y ser extensa así, en el sentido cartesiano.

Según Leibniz, tenemos que explicar esta resistencia como debida a fuerzas: la cosa tiene «una fuerza y una inclinación, por así decirlo, a conservar su estado y... ofrecer resistencia a la causa del cambio» [12]. Hay fuerzas que resisten la interpenetración: fuerzas repelentes o de repulsión. Así pues, el cuerpo o materia es, según la teoría de Leibniz, *espacio lleno de fuerzas de repulsión*.

Este es un programa para una teoría capaz de explicar la propiedad cartesiana esencial del cuerpo —la extensión— y el principio cartesiano de causación por empuje.

Como el cuerpo, o la materia o la extensión física, debe explicarse por fuerzas que llenan el espacio, la teoría de Leibniz es una teoría de la *estructura* de la materia, como el atomismo. Pero Leibniz rechazó los átomos (en los que había creído de joven). Porque los átomos, en aquel tiempo, se consideraban cuerpos muy pequeños, trozos pequeñísimos de materia, *extensiones* pequeñísimas. Así, el problema de la extensión y la impenetrabilidad era precisamente el mismo para los átomos que para los cuerpos grandes. En consecuencia,

[12] *Philosophische Schriften*, ed. Gerhardt, 2, p. 170.

los átomos —átomos extensos— no podían servir para *explicar* la extensión, la propiedad más fundamental de la materia.

¿En qué sentido, sin embargo, puede decirse que el espacio está «lleno» de fuerzas de repulsión? Leibniz concibe esas fuerzas como emanando y —*sólo en ese sentido*— como localizadas en puntos inextensos, las «*mónadas*»: son fuerzas centrales cuyos centros son puntos inextensos. (Al ser una intensidad ligada a un punto, una fuerza puede compararse, por ejemplo, con la pendiente de una curva en un punto, es decir, con una «diferencial»: no puede decirse que las fuerzas tengan extensión, de la misma manera que no la tienen las diferenciales, aunque sus intensidades pueden, naturalmente, medirse y expresarse con números; y siendo intensidades inextensas, las fuerzas no pueden ser «materiales» en el sentido cartesiano.) Así, puede decirse que un trozo extenso de espacio —un cuerpo en sentido geométrico— está «lleno» de los puntos geométricos o de las «mónadas» que están incluidos en él.

Para Leibniz, como para Descartes, no puede haber vacío: el espacio vacío sería espacio libre de fuerzas de repulsión y, como no opondría resistencia a la ocupación, sería ocupado enseguida por la materia. Podría describirse esta teoría del diplomático Leibniz como una teoría política de la materia: los cuerpos, como los estados, tienen que tener fronteras o límites que deben ser defendidos por fuerzas de repulsión; y un vacío físico, igual que un vacío de poder político, no puede existir, porque al instante sería ocupado por los cuerpos (o estados) vecinos. Así pues, podríamos decir que hay una presión general en el mundo que resulta de la acción de las fuerzas de repulsión y que, donde no hay movimiento, tiene que haber un equilibrio dinámico debido a la igualdad de las fuerzas presentes. Mientras que Descartes podría explicar un equilibrio sólo como una mera ausencia de movimiento, Leibniz explica el equilibrio —y también la ausencia de movimiento— como mantenido dinámicamente por fuerzas iguales y opuestas (cuya intensidad puede ser muy grande).

Eso, en cuanto al atomismo puntual (o de las mónadas) que surgió de la crítica de Leibniz de la teoría cartesiana de la materia. Su doctrina es claramente metafísica; y da lugar a un programa metafísico de investigación: el de explicar la extensión (cartesiana) de los cuerpos con ayuda de una teoría de fuerzas.

El programa fue realizado detalladamente por Boscovich (a quien se anticipó, en parte, Kant [13]). Las contribuciones de Kant y de Bos-

[13] La obra de Boscovich, *Theoria Philosophiae Naturalis,* se publicó por primera vez en 1758 en Viena; la *Monadologia Physica,* de Kant, en 1756, en Königsberg. Treinta años después, Kant repudió parte de su monadología en su *Metaphysical Foundations of Natural Science,* 1786. Aunque la idea esencial de la monadología de Boscovich se encuentra en Kant (véase Kant, *propos.* iv y v respecto al número *finito* de mónadas

covich quizá sean mejor apreciadas si digo antes unas palabras sobre el atomismo en su relación con la dinámica de Newton.

La teoría de la inexistencia del vacío de la escuela eleático-platónica y de Descartes y Leibniz tiene una dificultad inherente: el problema de la compresibilidd de los cuerpos y también el de la elasticidad. Por otro lado, la teoría de Demócrito de «átomos *y vacío*» (éste era el lema del atomismo) se había concebido, en gran parte, para hacer frente precisamente a esa dificultad. El vacío entre los átomos, la porosidad de la materia, explicaría no sólo la posibilidad de movimiento, sino también la de compresión. Pero la dinámica de Newton (y la de Leibniz) crearon una nueva dificultad grave para la teoría atomista de la elasticidad. Los átomos eran trozos pequeños de materia y si la compresibilidad y la elasticidad habían de explicarse por el movimiento de los átomos en el vacío, los átomos, a su vez, no podían ser compresibles ni elásticos: tenían que ser absolutamente inelásticos. (Así es como los concebía Newton.) Por otro lado, no podía haber empuje, ni acción por contacto, entre cuerpos inelásticos, según ninguna teoría que explicase —como la de Newton o Leibniz— las fuerzas como proporcionales a las *aceleraciones*. Porque un empuje dado por un cuerpo absolutamente inelástico a otro cuerpo igual tendría que ser *instantáneo* y una aceleración instantánea sería una aceleración *infinita,* que implicaría fuerzas infinitamente grandes [14].

Así, sólo un empuje *elástico* puede explicarse por fuerzas finitas; y eso significa que tenemos que suponer que el empuje es siempre elástico. Sin embargo, si queremos explicar el empuje elástico dentro de una teoría de átomos inelásticos, *tenemos que renunciar por completo a la acción por contacto.* Tenemos que sustituirla por *fuerzas de repulsión a corta distancia entre los átomos* o, como podría llamarse, *acción a corta distancia o acción en la proximidad del agente.* Entonces, los átomos tienen que repelerse entre sí con fuerzas que aumentan rápidamente al disminuir la distancia (y que se harían infinitas para una distancia cero).

De este modo, estamos obligados, por la lógica interna de la teoría dinámica de la materia, a admitir fuerzas de repulsión (centrales)

---

discretas presentes en los cuerpos finitos, y *propos* x, respecto a las fuerzas centrales que ejercen atracción a grandes distancias y repulsión a distancias cortas y respecto a la explicación que da Kant a la extensión), la obra de Kant es muy esquemática comparada con la de Boscovich. [*Cf.* la discusión de Popper sobre Boscovich en *El yo y su cerebro (S. & I. B.,* 1977, pp. 190-192). *Ed.*]

[14] Kant enuncia con claridad el argumento en su *Metaphysical Foundations,* «General Note to the Mechanic» (el último párrafo del tercer capítulo); véase también su *Monadology propos.* xiii y su *New Doctrine of Motion and Rest,* 1758 (la sección sobre el Principio de Continuidad). Argumentos similares se encuentran en Leibniz, que escribe (*Mathematische Schriften,* ed. Gerhardt, 2, p. 145) «porque parece que sólo la elasticidad hace que los cuerpos reboten».

en la mecánica. Pero si las admitimos, entonces uno de los dos supuestos fundamentales del atomismo —el supuesto de que los átomos son pequeños cuerpos extensos— se hace superfluo; como tenemos que sustituir los átomos por centros leibnizianos de fuerzas de repulsión, podemos sustituirlos igualmente por los *puntos inextensos* de Leibniz, e identificar así a los átomos con las *mónadas* de Leibniz. Parece, sin embargo, que tenemos que retener el otro supuesto fundamental del atomismo: el vacío. Como las fuerzas repulsivas tienden a infinito si la distancia entre los átomos o mónadas tiende a cero, está claro que tiene que haber *distancias finitas* entre las mónadas: la materia consiste en un vacío en el que hay centros discretos de fuerza.

Los pasos aquí descritos los dieron Kant y Boscovich. Puede decirse que dan una síntesis de las ideas de Leibniz, Demócrito y Newton. La teoría es, como la que contempló Leibniz, una teoría de la *estructura de la materia* y, por tanto, una *teoría* explicativa *de la materia*. La materia extensa se explica por algo que no es materia, por entidades inextensas tales como fuerzas y mónadas, los puntos inextensos de los que emanan las fuerzas. La *extensión* cartesiana de la materia, en especial, es explicada por esta teoría de una manera sumamente satisfactoria. En realidad, la teoría hace aún más: es una *teoría dinámica de la extensión* que explica no sólo la extensión en equilibrio —la extensión de un cuerpo cuando todas las fuerzas, atractivas y repulsivas, están en equilibrio—, sino también el hecho de que la extensión cambie bajo presión externa o impacto o empuje [15].

Hay otro desarrollo, casi igualmente importante, de la teoría cartesiana de la materia y del programa de Leibniz de dar una explicación dinámica de la materia. Mientras que la teoría de Kant-Boscovich anticipa, en un bosquejo aproximado, la teoría moderna de la materia extensa como compuesta de partículas elementales dotadas de fuerzas de atracción y repulsión, este segundo desarrollo es el antecesor directo de la teoría de campos de Faraday y Maxwell.

---

[15] Es importante advertir que no hay que identificar las fuerzas de Boscovich con las fuerzas de Newton: *no* son iguales a la aceleración multiplicada por la masa, sino iguales a la aceleración multiplicada por un número puro. (El número de mónadas.) Este punto ha sido puesto en claro por L. L. Whyte (en una nota muy interesante en *Nature*, 179, 1957, pp. 284 y ss.). Whyte resalta los aspectos «cinemáticos» de la teoría de Boscovich (en oposición a sus aspectos «dinámicos» en el sentido de la dinámica de Newton). Me parece que los comentarios de Whyte sobre los críticos de Boscovich son correctos. (Quizá deba expresar esto diciendo que Boscovich da una teoría explicatoria no sólo de la extensión y la gravedad, sino también de la masa de inercia de Newton.) Por otro lado, aunque las fuerzas de Boscovich son, como resalta Whyte con razón, *aceleraciones*, desde un punto de vista formal o dimensional, son, desde un punto de vista físico, intuitivo y metafísico, *fuerzas* —muy parecidas a las de Newton: son disposiciones que existen por derecho propio, son las causas que *determinan* las aceleraciones. (Kant, por otro lado, piensa en términos puramente newtonianos y atribuye inercia a sus mónadas; véase *propos.* xi.)

El paso decisivo en este desarrollo se encuentra en *Metaphysical Foundations of Natural Science,* de Kant, en donde repudia [16] su doctrina de la monadología, según la cual la materia es discontinua. Ahora sustituye esa doctrina por la de la *continuidad dinámica de la materia* (como una apariencia). Su argumento puede expresarse como sigue:

La presencia de materia (extensa) en una cierta región del espacio es un fenómeno que consiste en la presencia de fuerzas de repulsión en esa región —fuerzas que son capaces de detener la penetración (es decir, fuerzas de repusión que son, como mínimo, iguales a las fuerzas de atracción más la presión en ese lugar)—. En consecuencia, es absurdo suponer que la materia está formada de mónadas (de las cuales irradian las fuerzas de repulsión); porque la materia estaría presente en lugares en donde no están presentes esas mónadas, pero donde las fuerzas que emanan de ellas son suficientemente fuertes como para detener a otra materia. Además, por la misma razón, la materia estará presente *en cualquier punto entre* dos mónadas cualesquiera que pertenezcan al trozo de materia en cuestión (y que, supuestamente, lo constituyan).

Sean cuales fueren los méritos del argumento [17], hay mucho mérito en la propuesta de poner a prueba la idea de algo continuo (y elástico) que se compone de fuerzas. Porque esa es, simplemente, la idea de un campo de fuerzas, bajo el aspecto de idea de la materia continua. Me parece interesante que esta segunda explicación dinámica de la materia extensa (cartesiana) y de la elasticidad fuese desarrollada matemáticamente por Poisson y Cauchy y que la forma matemática de la idea de Faraday de un campo de fuerzas, debida a Maxwell, pueda describirse como un desarrollo de la forma de Cauchy de la teoría de la continuidad de Kant.

Así pues, las dos teorías de Kant y la teoría de Boscovich —que fueron los principales intentos de llevar a cabo el programa de Leib-

---

[16] Véase el segundo capítulo, teorema 4, sobre todo el primer párrafo de la nota 1 y la nota 2. El repudio de Kant se basa en su «idealismo transcendental»: rechaza la monadología como una doctrina de la *estructura espacial de las cosas en sí mismas.* (Esto, para él, es una «mezcla de esferas» —algo parecido a una «confusión de categorías».)

[17] Como todas las supuestas *pruebas* en física, la prueba de Kant no es válida, ni siquiera en la forma que se da aquí, que trata de mejorar un poco la versión del propio Kant. (Kant identifica ilícitamente «en movimiento», en el sentido de una fuerza «en movimiento» con «movible»; *cf.* el penúltimo párrafo de su nota al teorema 4. La ambigüedad es mala, pero hace resaltar su intención de identificar la presencia de una fuerza en movimiento con la de materia movible.)

La situación lógica es, brevemente, como sigue. En su obra poscrítica, Kant usa su idealismo transcendental para eliminar (por medio de un argumento válido, por cierto) sus objeciones originales contra la doctrina de la materia continua, y piensa, entonces, que podría *demostrar* la continuidad —y utiliza un argumento no válido que, sin embargo, es interesante e importante porque le obliga a llevar su dinamismo a sus límites extremos (más allá de lo que había anticipado en sus definiciones).

niz de una teoría dinámica que explicase la materia extensa cartesiana— fueron, conjuntamente, los antecesores de todas las teorías modernas de la estructura de la materia (las de Faraday y Maxwell, de Einstein, de De Broglie y de Schrödinger), y del «dualismo de materia y campo» que, visto bajo esta luz, quizá no esté tan enraizado como puede parecerles a aquellos que, cuando piensan en la materia, no pueden escapar de un modelo newtoniano o, ni siquiera, de un tosco modelo cartesiano y no dinámico.

Otra importante influencia que se deriva de la tradición cartesiana —y de la tradición kantiana, a través de Helmholtz— era la idea de explicar los átomos como vórtices del éter; una idea que llevó al modelo del átomo de Lord Kelvin y de J. J. Thomson, cuya refuta[ción] experimental por Rutherford marca el comienzo de lo que puede describirse como la moderna teoría del núcleo atómico.

Uno de los aspectos más interesantes del desarrollo que acabo de esbozar es su *carácter puramente especulativo,* junto con el hecho de que esas especulaciones metafísicas resultaron *susceptibles a la crítica* —que pudieron ser discutidas críticamente—. Fue una discusión inspirada por el deseo de entender el mundo y por la esperanza, la convicción de que la mente humana puede, al menos, tratar de entenderlo.

El positivismo, de Berkeley a Mach, se ha opuesto siempre a esas especulaciones; y es muy interesante ver cómo Mach seguía sosteniendo la concepción de que no podía haber una teoría física de la materia. (La materia no era, para él, más que una «sustancia» metafísica y, como tal, superflua, si no carente de sentido.) Sostuvo esta concepción en un momento en que la teoría metafísica de la estructura de la materia se había convertido en una teoría física contrastable. (Véase también *Realismo y el objetivo de la ciencia,* tomo I de este *Post Scriptum,* parte 1, sección 17.) Es todavía más interesante, y algo irónico, que esas concepciones de Mach tuviesen la máxima influencia en un momento en que ya nadie ponía seriamente en duda la teoría atómica, y que las concepciones de Mach sigan teniendo la mayor influencia sobre las principales figuras de la física atómica, especialmente sobre Bohr, Heisenberg y Pauli.

Sin embargo, las excelentes teorías de estos grandes físicos son el resultado de sus intentos de entender la estructura del mundo físico y de criticar los resultados de esos intentos. Así, sus propias teorías físicas pueden muy bien compararse con lo que esos físicos, y otros positivistas, tratan de decirnos hoy: que no podemos, en principio, tener la esperanza de llegar algún día a entender algo sobre la estructura de la materia: que la teoría de la materia debe continuar siendo para siempre un asunto privado del experto, el especialista —un misterio envuelto en tecnicismos, en técnicas matemáticas y en «semántica»: que la ciencia no es más que un instrumento, desprovisto de interés filosófico o teórico, y de significación exclusivamente «tecnoló-

gica» o «pragmática» o «funcional». Yo no me creo una sola palabra de esa doctrina posracionalista. Sin duda, tendremos que descartar la mayor parte de nuestras teorías muchas veces; pero parece que por fin hemos encontrado formas de entender el mundo físico.

21. CISMAS, PROGRAMAS Y SUEÑOS METAFISICOS

La lista de los programas metafísicos que he dado en la sección anterior se esbozó teniendo dos propósitos fundamentales en mente. Uno era arrojar algo de luz sobre la significación de la crisis actual de la teoría física: el rechazo del programa de Faraday-Einstein-Schrödinger nos ha dejado sin una imagen unificadora, sin una teoría del cambio, sin una cosmología general. En lugar de una situación del problema dentro del programa de investigación, la situación fundamental del problema en nuestros días surge de un cisma en física, de un choque entre dos programas de investigación, ninguno de los cuales parece estar cumpliendo su cometido.

Situaciones como ésta se han planteado anteriormente, por supuesto. Hubo, por ejemplo, el cisma entre el cartesianismo, que sólo permite acción por contacto (es decir, a distancias decrecientes) y la teoría de Newton, que permite la acción a distancia —un cisma en el que el mismo Newton tomó posiciones en contra de su propia teoría [18]—. Pero la situación actual difiere de algún modo de todas las anteriores. El alentador programa de Einstein y Schrödinger ha sido atacado por los teóricos cuánticos y, según el juicio de la mayoría de los físicos, ha sido eliminado con éxito. Pero los que lo atacaron no han hecho ningún intento de sustituirlo por un programa igualmente vigoroso.

Todo esto, creo yo, es debido a la filosofía de la ciencia que predomina en estos momentos —a la casi universal aceptación del instrumentalismo, la teoría de teorías que desarrollaron el cardenal Bellarmino (uno de los inquisidores en el caso contra Giordano Bruno) y el obispo Berkeley para oponerse a la creencia de Galileo y Newton de que la ciencia puede buscar la verdad. En la gran lucha sobre la cuestión fundamental de la tradición racionalista —*si el intelecto humano, sin la ayuda de la revelación divina, puede o no descubrir algunos de los secretos de nuestro mundo*— la mayoría de los principales teóricos cuánticos (menos Einstein y Schrödinger) se han puesto del lado del cardenal y el obispo, contra Galileo, Kepler y Newton [19].

---

[18] Véase mi *Desarrollo del conocimiento científico [C. & R.]*, capítulo 3, especialmente sección iii.

[19] He relatado esta historia en el capítulo que acabo de citar. [Véase también *Realismo y el objetivo de la ciencia (R. & A. Sc.)*, tomo I del *Post Scriptum*, parte 2, secciones 10-14; y sección 2 de este tomo. *Ed.*]

Aunque la aceptación del instrumentalismo no ha llevado por sí sola a la destrucción del programa de Einstein y Schrödinger, ha llevado a la casi universal aquiescencia en la ausencia de un programa alternativo. En realidad, con el llamado «principio de complementariedad» de Bohr, el instrumentalismo anuncia con orgullo la «renuncia» a cualquier programa de esa índole. Lo que queda es dar vueltas al formalismo —una parte claramente legítima e incluso necesaria del método de prueba y error, pero sólo una parte de él, y una con pocas probabilidades de producir resultados importantes cuando falta un intento coherente de entender el mundo.

La herejía de David Bohm continúa con algo parecido a una parte del programa de Einstein y Schrödinger; estoy pensando en su intento de revivir la teoría de De Broglie de las ondas piloto. Pero, a pesar del programa realista y objetivista de Bohm, su teoría no es satisfactoria desde el punto de vista que presentamos en este *Post Scriptum*. No sólo está destinada, como todas las demás teorías deterministas, a interpretar subjetivamente las probabilidades, sino que, incluso, retiene la «interferencia del sujeto con el objeto», de Heisenberg, aunque trata de interpretar esa interferencia objetivamente. Como consecuencia, la réplica de Bohm a la crítica de Pauli y Einstein (propuesta primero por Pauli, contra las ondas piloto de De Broglie, y, más tarde, por Einstein contra Bohm) me parece totalmente insatisfactoria e inaceptable [20].

Tres cuestiones fundamentales han llevado al cisma:

1. Indeterminismo *versus* determinismo.
2. Realismo *versus* instrumentalismo.
3. Objetivismo *versus* subjetivismo.

La tercera cuestión surge, más especialmente, en relación con las relaciones de indeterminación de Heisenberg y con cuestiones como la reducción del paquete de ondas; y, más en general, con respecto a la interpretación de la probabilidad.

Apenas será necesario repetir qué partido toman los diferentes grupos en relación con estas cuestiones.

Einstein, De Broglie, Schrödinger y Bohm son deterministas y realistas; son objetivistas con respecto a los fines de la teoría física, pero subjetivistas (con mayor o menor consistencia) respecto a la interpretación de la teoría de la probabilidad.

La escuela ortodoxa de Copenhague, representada por Bohr y Heisenberg y apoyada por Pauli y quizá, en menor grado, por Born, es indeterminista e instrumentalista, aunque todos los representantes mencionados tienen algunas observaciones antiinstrumentalistas en su fa-

[20] *Scientific Papers Presented to Max Born*, 1953; *cf. L.I.C.*, Apéndice *xi.

vor. Lo que es más característico de la actitud de esta escuela —uno de sus estados característicos *[eigenstates],* por decirlo así— es una oscilación entre el enfoque objetivo y el subjetivo en la cual, debido a un tipo de resonancia, todos los miembros participan.

Mi propia perspectiva es que el *indeterminismo es compatible con el realismo* y que la percepción de este hecho hace posible adoptar consistentemente una epistemología objetivista, una interpretación objetivista de toda la teoría cuántica y una interpretación objetivista de la probabilidad.

Aunque me disgusta la vena subjetivista de la interpretación ortodoxa, aprecio su rechazo del determinismo de Einstein, Schrödinger y Bohm y su rechazo de las teorías deterministas *prima facie* en física; y estoy de acuerdo con la sustancia (aunque apenas con la forma o con el estilo profético —el estilo del determinismo histórico—) de un pasaje de Pauli, tomado de una carta a Born, en la que Pauli rechaza el programa determinista de investigación con las palabras siguientes: «A pesar de todos los esfuerzos retrógrados (Schrödinger, Bohm y los demás, y, en cierto sentido, también Einstein) estoy seguro de que el carácter estadístico de la función Ψ, y, por tanto, de las leyes de la naturaleza —en el que usted ha hecho hincapié desde el principio mismo, en contra de Schrödinger— determinará el estilo de las leyes al menos durante algunos siglos. Es posible que posteriormente... se encuentre algo enteramente nuevo, pero soñar con una vuelta atrás, al estilo clásico de Newton y Maxwell (y no son nada más que sueños, en lo que esos señores se complacen), eso me parece desesperado, descaminado, de mal gusto. Y podríamos añadir "no es siquiera un hermoso sueño"» [21].

Me propongo ignorar (o archivar «durante algunos siglos») la manera, algo ruda y, en mi opinión, «retrógrada» o, más exactamente, decimonónicamente historicista [22], en que Pauli expresa sus valoraciones. Porque me parece que hay mucho de admirable en este pasaje. Estoy enteramente de acuerdo con su rechazo del programa de Faraday-Einstein-Schrödinger (lo que él llama, con cierta falta de sensibilidad, «el estilo clásico de Newton y Maxwell») en razón de su adhesión al determinismo *prima facie,* y estoy todavía más de acuerdo

[21] Citado en Max Born, «The Interpretation of Quantum Mechanics», *British Journal for the Philosophy of Science,* 4, 1953, p. 106. Las palabras sustituidas aquí por puntos suspensivos (porque no parecen pertinentes a la discusión en este momento, igual que no lo es la profecía historicista y determinista contenida en las palabras «durante varios siglos») son las siguientes: «por ejemplo, en relación con los procesos de la vida». *(Cf.* sección 28, *infra.)* En el *British Journal* hay una errata evidente («Bohr», en lugar de «Bohm»).

[22] Véase *La miseria del historicismo [The Poverty]* y *La sociedad abierta [O.S.];* y también *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo,* tomo II del *Post Scriptum,* secciones 20-24.

con su petición en favor de la admisión de las teorías e interpretaciones probabilistas (aunque las describa como «estadísticas»). Y no encuentro objeción alguna a su descripción de los programas metafísicos de investigación como «sueños» en el sentido de sueños-deseo; porque son intentos de formular nuestras esperanzas, nuestras expectaciones y nuestras ambiciones con respecto al aumento de nuestro conocimiento. Sin embargo, la manera de hablar de Pauli, aquí, de esos sueños delata una actitud ambivalente hacia ellos. Parece haber un ligero pero interesante cambio de actitud entre las dos primeras ocurrencias de la palabra «sueño» en este pasaje y la última. Si no me equivoco, esas dos primeras ocurrencias indican algo parecido a una actitud antimetafísica y antirrealista (y, por tanto, una actitud instrumentalista), que he descrito con la frase «dura y pragmática». Pero hay un cambio sutil cuando Pauli añade «no es siquiera un hermoso sueño». Esto parece expresar dos sentimientos diferentes. No sólo expresa el sentimiento de que la metafísica de Parménides —el sueño del universo como bloque— no es ya un programa de investigación que pueda atraer e inspirar, sino también, si no me equivoco, el anhelo de algo mejor, el deseo de poseer una imagen metafísica del mundo que sea atractiva e inspiradora.

Con esa actitud, estoy enteramente de acuerdo. Con todo lo atractivo e inspirador que era el programa de Einstein-De Broglie-Schrödinger en su grandiosa concepción intuitiva —la explicación de la materia y todas sus interacciones, en términos de campos y de perturbaciones en campos— hay algo errado e inadecuado en el determinismo metafísico con su universo en bloque. Y aunque era un hermoso sueño —y un sueño que atrajo mucho a Pauli en un momento— parece casi inevitable que los que han respirado el aire más libre del indeterminismo no se sientan ya satisfechos con él: Pauli puede decir muy bien ahora que ya no es un hermoso sueño o un sueño esperanzador.

Respecto a los sueños de Pauli sobre el futuro de la ciencia, sólo podemos suponer cuáles son. Ha expresado su preocupación por la ciencia contemporánea y por su incapacidad de presentar una imagen total y unificadora del mundo [23]. De esta observación y de su creencia en el indeterminismo y en las leyes probabilísticas de la naturaleza, podemos, quizá, conjeturar los rasgos de una imagen que pudiera parecerle aceptable a Pauli.

En este epílogo metafísico, lo admito, «no son nada más que sueños» en lo que quiero «complacerme». Aunque los sueños que voy a describir son los míos, espero que, en su tendencia general, no difieran demasiado de los de Pauli. Supongo que diferirían muy poco

[23] *Cf.* W. Pauli, *Studien aus dem Jung-Institut,* 4, 1952, pp. 109-194, especialmente el final.

si Pauli pudiera olvidar, al menos en sus sueños, el elemento instrumentalista y subjetivista del credo ortodoxo; es decir, si pudiera olvidar la «complementariedad» o, lo que es lo mismo, si recordara que *es probable que el mundo fuera tan indeterminista como es aunque no hubiera «sujetos observadores» que experimentasen e interfiriesen con él.* Los que yo considero principales argumentos de Pauli —el indeterminismo y el carácter probabilista de las leyes de la naturaleza— se encontrarán plenamente representados en mi sueño metafísico. Al mismo tiempo, y sin ser incoherente, mi sueño abarca también el programa de Faraday, Einstein y Schrödinger de una realidad física determinada por leyes deterministas *prima facie;* una realidad que considero que consiste en propensiones. Esto hace posible unir esas dos concepciones, indeterminismo y determinismo, de una manera muy natural, por medio de un argumento de correspondencia (por el cual se muestra que las teorías deterministas son aproximaciones de teorías indeterministas); y sugiere, al mismo tiempo, una teoría de la materia que explica las partículas en términos de conceptos de campos.

Trataré ahora de exponer mi programa metafísico de la forma más racional que pueda, en el espacio de que dispongo [24].

22. EL DETERMINISMO CLASICO MODIFICADO POR UN ARGUMENTO DE CORRESPONDENCIA

Empecemos por representarnos visualmente nuestro cambiante mundo, mientras cambia de un instante a otro. Los estados que pertenecen a los instantes consecutivos están de una u otra forma, estrechamente conectados. Esa es la razón de que nuestro mundo presente cierto grado de orden en lugar de un completo desorden; es la razón de que sea un cosmos y no un caos. Pero vamos a representarnos la conexión entre los estados instantáneos no como una conexión determinista, sino como algo a medio camino entre un universo en bloque, determinista, y el caos.

Para comprender con mayor claridad este punto, imaginemos que hemos vinculado una tira de película a un cierto estado instantáneo dado del mundo, es decir, a cierta «lámina de tiempo» dada del mundo, y que usamos esa tira de película para representarnos lo mejor posible todas las láminas de tiempo pasadas y futuras del mundo. *(Cf. El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo,* tomo II del *Post Scriptum,* sección 26.)

Supondremos, como primer paso o primera aproximación, que la tira de película que hemos vinculado a la lámina de tiempo dada, es

[24] Escribí esto, originariamente, en 1954 ó 1955, con la intención de que fuese uno de los «nuevos Apéndices» a *L.I.C.* y quedaba muy poco espacio.

una película laplaciana o determinista o, en otras palabras, que representa un universo en bloque, determinista: el que está determinado por el estado instantáneo dado o lámina de tiempo; porque sabemos que un estado instantáneo o lámina de tiempo es suficiente, según Laplace, para determinar todos los estados pasados y futuros de láminas de tiempo de un universo determinista. Cada uno de los estados instantáneos o láminas de tiempo del universo determinista lo suponemos representado por una de las escenas de las que se compone la tira de película.

Supongamos ahora que hemos vinculado una película similar determinista o laplaciana a una cantidad considerable de láminas de tiempo consecutivas de nuestro universo real no determinista.

El decir que nuestro propio universo —el universo real— es no-determinista es suponer que las tiras de película que hemos vinculado a las diversas láminas de tiempo *no* representan *exactamente* a nuestro universo; porque si lo hicieran, entonces nuestro mundo real sería laplaciano y determinista, lo que es contrario a nuestro supuesto. Sin duda, las escenas inmediatamente anteriores y posteriores a la lámina de tiempo real a la que hemos vinculado la tira de película serán muy similares a los estados reales o láminas de tiempo a las que se supone que representan: esto lo sabemos por el éxito de la física clásica. Pero diferencias mínimas se irán acumulando al ir apartándonos de la lámina de tiempo del mundo real a la que está unida la película; y si nos alejamos lo suficiente, entonces las escenas serán inútiles para la predicción.

Si nuestro mundo real fuese determinista, entonces cada tira de película lo representaría completamente. Es más, todas las tiras de película serían exactas entre sí (puesto que cada una representaría el mismo curso del mundo). Pero como suponemos que nuestro mundo no es determinista, todas, o casi todas las tiras imaginarias de película —las tiras de película que hemos vinculado, en nuestra imaginación, a las diversas láminas de tiempo del mundo real— diferirán unas de otras. Admitamos que dos películas imaginarias cualesquiera que estén unidas a láminas de tiempo vecinas serán muy similares; pero, por regla general, no serán réplicas exactas entre sí —a menos, claro, que la segunda de las dos láminas de tiempo sea exactamente como la hubiera predicho un físico determinista basándose en la primera.

Hasta el momento he operado con dos supuestos y los he ilustrado con ayuda de nuestras tiras de película imaginarias (que pronto necesitaré para llevar más lejos el argumento): el supuesto de que nuestro mundo es indeterminista y el supuesto de que existe una teoría física determinista (por ejemplo, la «física clásica») que tiene éxito, en el sentido de que sus predicciones son buenas aproximaciones a la verdad.

Volvemos ahora, durante un momento, del extremo clásico al otro

extremo —al supuesto de que el mundo es completamente caótico—; y tratamos de vincular otra sucesión de tiras de película imaginarias a la sucesión de las láminas de tiempo real, unas tiras que representen este supuesto. ¿Cómo lo haríamos? El supuesto de que el mundo es caótico no nos permite, obviamente, hacer ninguna predicción. En consecuencia, las tiras de película carecerán por completo de información definida. Dejarán abiertas *todas las posibilidades,* permitirán que cualquier estado sea seguido por cualquier otro estado (lógicamente) posible. Suponiendo que supiéramos de algún modo cuál sería un «estado posible» (lógicamente) del mundo, cada una de nuestras tiras de película tendría que estar formada de escenas, incluyendo un catálogo de todos los estados posibles del mundo y atribuyendo igual peso (o probabilidad) a cada posibilidad. En consecuencia, todas las tiras de películas vinculadas a las diversas láminas de tiempo serían exactamente iguales (como lo serían en un mundo determinista); además todas las escenas de cada una de las películas serían exactamente iguales, como lo serían si viviéramos en un mundo sin ningún cambio en el tiempo: porque sólo hay *un* catálogo completo de posibilidades. (Este catálogo puede presentarse de varias maneras, por ejemplo, por medio de «espacios de probabilidades» —espacios abstractos multidimensionales tales que ciertos subespacios tridimensionales representen, cada uno, una disposición posible, o una configuración de partículas; o que cada punto —o vector— represente uno de los estados posibles del sistema físico en cuestión que, según nuestro supuesto, es el sistema del mundo.)

Volviendo a las tiras de película deterministas o «clásicas», podemos ahora, si queremos, calcular cómo es de similar cada escena a la lámina de tiempo a la que se supone que representa. Por ejemplo, podemos medir la desviación de cada detalle representado del estado real del mundo que se supone que representa. Con este fin, tendríamos que convenir primero en alguna definición de un «detalle elemental» o «suceso». (No tiene que ser, aproximadamente hablando, un detalle demasiado pequeño, puesto que la suposición de que la física clásica es aplicable a *todo* detalle estructural del mundo puede causarnos problemas; por consiguiente, nuestra película clásica no puede contener una descripción muy detallada. Sin embargo, no es necesario, para nuestros propósitos, decir aquí nada más sobre este punto.) Además, podemos ponernos de acuerdo sobre algún criterio del tipo sí-o-no por el cual decidir si un suceso elemental está representado adecuadamente o no en nuestra escena. Podemos calcular entonces el número medio de las respuestas afirmativas o, en otras palabras, la oportunidad o la probabilidad de obtener de la escena en cuestión una predicción elemental correcta. Esta probabilidad puede tomarse como medida de la similaridad entre la escena y el estado real del mundo. La probabilidad será casi igual a 1 para las escenas próxi-

mas a la lámina de tiempo a la que se ha unido la tira de película y mostrará una tendencia general a disminuir según nos alejamos de ese instante hacia el «pasado» o el «futuro» de la película. El punto en el que la película se hace completamente inútil para las predicciones se alcanzará en cuanto tengamos que atribuir a una escena la probabilidad de 1/2 o menos; porque eso significa que una respuesta hecha al azar a cualquier pregunta de sí-o-no sobre el mundo será tan buena como una respuesta basada en nuestra película clásica. Desde esa escena en adelante, sabemos que, incluso aunque el grado de correspondencia entre una escena y la lámina del tiempo sea mayor que 1/2, eso sólo puede deberse a la casualidad; así pues, a partir de esa escena, la película clásica será tan inútil para las predicciones como el catálogo de posibilidades que representa el otro extremo, la hipótesis de un mundo caótico.

Hay que notar que no podemos, desde luego, *determinar de antemano* la probabilidad aquí descrita de las escenas futuras: como no sabemos de antemano cómo será el mundo real, no podemos determinar el número de sucesos en los que una escena predictiva sigue estando de acuerdo con la lámina de tiempo a la que representa. Tendremos que conformarnos con atribuir a las escenas algo parecido a probabilidades decrecientes en general de 1 a 1/2, dependiendo de su distancia temporal de la lámina de tiempo a la que está unida la película que las contiene. La tasa de este descenso sólo puede determinarse calculando la media de las pasadas correspondencias. (No hay necesidad, sin embargo, de profundizar más en esta cuestión, puesto que sustituiremos las probabilidades que hemos atribuido a nuestras tiras deterministas por una probabilidad completamente distinta que se incorporará, por así decirlo, a un tipo de tira de película indeterminista y no-clásica que se describirá en la sección 24.

He tratado de poner en claro algunos aspectos de la relación entre nuestro mundo real indeterminista y su representación determinista o clásica. Ha sido necesario operar con una sucesión de tiras de película, o con una multiplicidad de representaciones clásicas, que tienen que estar renovándose continuamente. Esta primera modificación de la física clásica fue un resultado inmediato de un argumento según el cual las ideas clásicas no pueden ser más que aproximaciones a una teoría mejor y a la verdad, puesto que ninguna representación científica puede predecir totalmente un mundo indeterminista.

De acuerdo con la mayoría de las interpretaciones restantes, yo concibo aquí la física clásica como una aproximación a la física cuántica. (Este es el «argumento de correspondencia»; *cf. Realismo y el objetivo de la ciencia,* tomo I del *Post Scriptum,* sección 15.) Sin embargo, hay una diferencia fundamental entre este modo de ver las cosas y la interpretación ortodoxa. Tomamos el indeterminismo como un hecho cosmológico que no tratamos de explicar. Pero la interpre-

tación ortodoxa trata de explicar este hecho como debido a nuestra interferencia con el proceso físico: como si el mundo hubiera sido determinista (o más determinista de lo que es ahora) si no hubiera habido en él hombres interfiriendo; como si los cuantos (como algunos niños) fuesen a comportarse de una manera más ordenada o predictible si nadie estuviera mirándolos. Esta concepción me parece absurda; para hacerla más aceptable, la interpretación ortodoxa se ve obligada a adoptar una actitud idealista o semi-idealista respecto al mundo: una actitud que hace que sea carente de sentido hablar de una realidad que existe cuando nadie está mirando. Pero no hace falta una suposición filosófica tan *ad hoc*. La situación es muy sencilla. Voy a tratar de mostrarlo.

Bohr ha comparado siempre el carácter natural, intuible, inmediatamente inteligible de la física clásica con el carácter más difícil, no intuible y sumamente complicado de la física cuántica; y ha sugerido que podemos ser capaces de hacer la física cuántica más inteligible para nosotros mismos si hacemos uso de argumentos de correspondencia, es decir, si mantenemos en nuestras mentes la transición del caso teórico-cuántico al caso clásico (este último podemos entenderlo intuitivamente). Ahora bien, acabo de hacer uso de un argumento de correspondencia con el propósito de trazar un esbozo de una imagen indeterminista del mundo; pero quiero llamar la atención del lector sobre el hecho de que la imagen resultante, no clásica, es más natural, más acorde con la experiencia normal y menos compleja que la perspectiva clásica de Hobbes o, por ejemplo, Laplace.

Porque, supongamos que conocemos la lámina de tiempo de hoy, o parte de ella, y que queremos predecir ciertos sucesos con un año de antelación. Creo que sería justo que esperásemos «naturalmente» oír si nos dicen que ciertos sucesos, tales como el vuelo de una abeja o el movimiento de una nube no son todavía predictibles, aunque pueden llegar a serlo, más o menos, si tenemos un conocimiento perfecto de una lámina de tiempo *muy poco anterior* a ellos; si nos dicen, además, que otros sucesos, tales como los eclipses solares y lunares, pueden predecirse con mucha antelación; si nos dicen, en general, que el conocimiento de una lámina de tiempo anterior en seis meses al suceso nos ayudaría a prever algunos de sus detalles un poco mejor que el conocimiento de una lámina de tiempo anterior en un año al suceso. Y éste es precisamente mi argumento. Lo que he tratado de expresar con ayuda de mi imagen es precisamente esto: que el indeterminismo nos obliga a adoptar la perspectiva de que no puede haber ninguna teoría que predetermine completamente todos los sucesos por venir; que, por tanto, cada lámina de tiempo produce su propia película predictiva que, sin embargo, pierde pronto su utilidad; que cuanto más alejadas del momento están las láminas de tiempo, mejor es la idea que nos dan de un suceso futuro respecto a todas ellas; y que,

por tanto, tenemos que intentar, si queremos una predicción detallada y fiable, obtener la descripción de una lámina de tiempo (o de parte de ella) de fecha cercana al suceso, tan cercana como sea posible.

Todo esto es muy sencillo; y me parece a mí que es más natural, intuitivamente, y que nos es más familiar que el sueño laplaciano de predictibilidad ilimitada. Es, en cierto modo, demasiado sencillo; y pronto (en la sección 24) enriqueceré mi imagen sustituyendo mis tiras de película deterministas o clásicas por otras: por tiras que describan las propensiones. Sin embargo, incluso en la sencilla versión que he dado en esta sección, nuestra imagen contiene toda la historia de la «reducción del paquete de ondas»: la transición de una base de información a otra, a una posterior y, por tanto, más completa y mejor. (Y si creyéramos, con Heisenberg, que esta «reducción» es lo mismo que «el elemento de discontinuidad en la teoría cuántica», entonces tendríamos que decir que nuestra muy simple y primitiva imagen incorpora ya la discontinuidad cuántica, es decir, la idea de un «salto cuántico» [25] que sólo muestra lo poco que este salto cuántico de los últimos tiempos tiene en común con la idea original.)

Antes de proceder a sustituir nuestras tiras clásicas de película por otras no clásicas, mostraré cómo la «reducción del paquete de ondas» aparece aquí como consecuencia de la hipótesis de un mundo indeterminista para el que la física clásica es sólo aproximadamente válida.

23. EL INDETERMINISMO Y LA LLAMADA «REDUCCION DEL PAQUETE DE ONDAS»

La concepción metafísica que estoy tratando de esbozar me parece similar, en muchos aspectos, a la concepción ortodoxa. Por esta razón, es importante apreciar claramente los principios que la diferencian de la concepción ortodoxa. Me refiero a su realismo y su objetivismo. Esto se conseguirá al continuar la exposición de la imagen que se ha introducido en la sección anterior y que consiste en una sucesión de imaginarias tiras clásicas de película, cada una de las cuales está unida a una de las láminas de tiempo y determinada por ella.

La sucesión de las láminas de tiempo reales es un proceso real, objetivo, posiblemente continuo. Las tiras de película son, naturalmente, imaginarias; pero son objetivas en el sentido de que cada una de ellas está lógicamente entrañada, por así decirlo, por una descripción completa de la lámina de tiempo a la que pertenece (en conjunción con un sistema completo de física determinista o un sistema «clásico»).

Puede plantearse la cuestión de si el cambio de una tira imagina-

[25] *Cf.* nota 40, en la sección 13, y texto.

ria de película a la siguiente puede representarse por medio de una función continua de las láminas de tiempo cambiantes, siempre que éstas cambien continuamente. Está claro que las suposiciones que hemos desarrollado hasta ahora no son suficientes para decidir sobre esta cuestión; pero la teoría cuántica parece implicar que una tira imaginaria de película tendrá que ser sustituida por otra siempre que tenga lugar alguna interacción, tal como una colisión, una emisión, una absorción o cualquier otra forma de intercambio energético. Así, en un mundo formado por partículas libres separadas por grandes distancias, *copias de la misma tira clásica de película podrían unirse, quizá, incluso a láminas de tiempo muy separadas unas de otras en el tiempo.* (Esto parece factible, en vista de la validez de la ley clásica de la conservación del momento.) Pero en un sistema mundial denso y complejo habría que unir películas *nuevas* después de intervalos de tiempo sumamente cortos, puesto que con cada interacción tendrían lugar estados nuevos e impredictibles.

Ahora bien, hemos visto que una predicción —digamos que una predicción de un suceso que ocurra el 1 de enero del año 2000— será, en general, más definida y fiable cuanto más cerca del suceso en cuestión esté la lámina de tiempo (total o parcial) que escojamos para basar en ella nuestra predicción. De modo que, si realmente estamos interesados en saber algo sobre ese suceso, trataremos, de vez en cuando, de «poner al día» nuestra información, es decir, de obtener información sobre una lámina de tiempo más reciente, para basar nuestra predicción en las últimas condiciones iniciales disponibles. Podemos hacer esto incluso en un mundo determinista, en vista de la limitada precisión de nuestras mediciones; pero en un mundo indeterminista tendremos que hacerlo incluso en el supuesto de que nuestra información relativa a las condiciones iniciales sea del todo exacta y completa.

Ahora bien, toda nueva predicción basada en información de este tipo, nueva y posterior, diferirá de algún modo de la predicción anterior. Esto no significa que la predicción anterior haya sido calculada equivocadamente. Sólo significa: 1) que tenemos que considerar la predicción como relativa a la lámina de tiempo o información sobre la que se basaba, y 2) que debe quedarnos claro que el uso de una lámina de tiempo posterior mejorará, en general, el valor de la predicción basada en ella.

La situación lógica es aquí precisamente la misma que la que nos encontramos en el análisis de la llamada «reducción del paquete de ondas». Porque, sea e el suceso cuya presencia o ausencia queremos predecir, y sean s_1, s_2... las tiras clásicas de película unidas a láminas de tiempo cada vez más alejadas del momento presente. (Todas las láminas de tiempo consideradas se supondrán anteriores al suceso e.) Sea

$$pred\ (e,\ s_1)$$

una predicción respecto a *e* a la luz de la escena adecuada de la tira s_1. Encontraremos que, en general, *pred (e,* s_1) y *pred (e,*s_2) no están de acuerdo y que, en general, la última será preferible a la anterior como predicción.

La transición de *pred (e,* s_1) a *pred (e,* s_2) corresponde exactamente a la transición del enunciado de probabilidades $p(e,s_1)$ a $p(e,s_2)$, donde «$p(a,b)$» significa la probabilidad de *a* dada la informacidon *b*. Pero una transición de $p(e,s_1)$ a $p(e,s_2)$ es, como hemos visto, precisamente lo que los teóricos cuánticos han llamado una «reducción del paquete de ondas». (Véase la sección 8, más arriba.) Han sugerido que esta reducción del paquete de ondas está relacionada y depende de: *a)* el *experimento* de medición por medio del cual obtenemos nueva información s_2, y *b)* la realización o actualización de lo que hasta el momento no era más que potencial. (La «transición de lo posible a lo real», de Heisenberg; véase la nota 10, en la sección 9, *supra* y las secciones 10 y 13.) Esos dos puntos, *a)* y *b)* se combinan a menudo en la sugerencia *c)* de que sólo bajo el estímulo de nuestra propia interferencia con el sistema físico, sólo debido a nuestro experimento para medir, tiene lugar la transición de lo posible a lo real. En nuestra imagen, por el contrario, la transición de lo posible a lo real tiene lugar siempre que emerge un nuevo estado del mundo; siempre que una nueva lámina de tiempo es actualizada o realizada, tanto si se la mide como si no. (De hecho, las observaciones y las mediciones son tan extremadamente raras que casi todas las «realizaciones de potencialidades» ocurren independientemente de ellas.) Mientras ocurra algo, mientras haya algún cambio, consistirá siempre en la actualización de ciertas potencialidades. Así, una nueva tira de película (y con ella, una oportunidad para la reducción del paquete de ondas) aparece siempre que tiene lugar una interacción cualquiera. Que *sepamos* u *observemos* el nuevo estado s_2, que sustituyamos *pred (e,*s_1) por *pred (e,*s_2), en nuestros intentos de predecir *e,* es completamente accesorio y en ningún modo produce la realización de las potencialidades. *El mundo cambia sin consideración hacia nosotros.* Podemos estar totalmente seguros de que han ocurrido muchas interacciones entre nuestra elección de la tira s_1 y nuestra elección de la tira s_2 y que esas interacciones no fueron influidas por nuestras elecciones.

Naturalmente, algunos cambios *son* debidos a nuestros experimentos y son importantes para nosotros, tanto en el terreno práctico como en el teórico. Pero a mí me parece que es un síntoma de miopía o de megalomanía permitir que nuestra visión del mundo o de la ciencia esté dominada o coloreada, siquiera, por las perturbaciones creadas por nuestros propios experimentos. Las transiciones de lo posible a lo real y las interacciones cuánticas estaban en marcha antes de que nadie interfiriera con nada y continuarán mucho después de que todos nosotros hayamos dejado definitivamente de interferir.

24. SUSTITUCION DE LAS PELICULAS CLASICAS POR PELICULAS PROPENSIVISTAS

Hasta aquí, nuestra modificación de la película clásica ha sido algo rudimentaria: sustituimos una película clásica imaginaria por una sucesión de muchas películas diferentes, cada una de ellas ligada a una lámina de tiempo del mundo real. Si queremos refinar esta imagen, podemos considerar que no hemos hecho, hasta ahora, uso del otro extremo, como lo he llamado: la representación del caos por un catálogo de todos los estados posibles. Supongamos, entonces, que poseemos este catálogo y una cinta de película tal que cada una de sus escenas consista en ese catálogo. Nuestro problema consiste en encontrar una sucesión de tiras de películas de un nuevo tipo, en algún lugar a medio camino entre esas dos sucesiones extremas de tiras de película, la clásica o la caótica. El nuevo tipo deberá, desde luego, darnos más información que el tipo clásico o el tipo caótico.

La solución de este problema (sugerida por la teoría cuántica) es ésta: el nuevo tipo de película consistirá, como el caótico, en catálogos de posibilidades; pero a cada una de esas posibilidades, se le atribuirá una media probabilística o «peso». Esto convierte al catálogo de posibilidades en una distribución probabilística —una distribución de propiedades.

Se recordará que en uno de los dos casos extremos expuestos en la sección 22 —en el caso del caos completo— encontrábamos que todas las películas se hacían idénticas y cada una no era más que la repetición del mismo catálogo completo de posibilidades. Pero una vez que atribuimos medidas o «pesos» a las posibilidades, habrá un número inmenso de catálogos completos diferentes, cada uno con una distribución diferente de los pesos entre las diversas posibilidades. Aún está más claro que si consideramos uno de esos catálogos ponderados, el que sustituya, por ejemplo, a una escena clásica no muy alejada en el tiempo de la lámina de tiempo a la que se une la película, entonces, el catálogo tendrá que dar mayor peso a aquéllos, entre los estados posibles, que sean muy similares al estado que predice la teoría clásica; en consecuencia, apenas dará peso a la mayoría de los estados restantes. Pero esto supone que, en cualquiera de las películas, la distribución de los pesos en «escenas» consecutivas (es decir, catálogos) estará estrechamente relacionada; o que la distribución de los pesos en un momento *determinará* la distribución de los pesos en el momento siguiente. En consecuencia, *la sucesión de escenas (de catálogos ponderados) en cada película será de un carácter determinista* —muy parecida a la sucesión de escenas en las películas deterministas o clásicas que consideramos en primer lugar (en la sección 22). La diferencia será ésta: leyes de un carácter determinista (aunque no necesariamente idénticas a las leyes clásicas) conectan ahora *catálogos de*

los «pesos» de todos los estados posibles del mundo, mientras que antes, las leyes clásicas conectaban una representación de un estado del mundo con la representación de otro estado del mundo [26].

El carácter de las nuevas leyes será determinista (y así, «cuasi-clásico») simplemente porque la distribución de probabilidades de la escena, o catálogo, posterior debe depender o ser función de la escena inmediatamente anterior (que es también un catálogo). Y esto sólo significa que algunos de los estados no van nunca, o casi nunca, seguidos de algunos otros estados: aunque esos otros estados sean lógicamente posibles, están excluidos por las leyes, que prohíben que sigan al estado precedente. Así, las leyes que determinan los pesos o la distribución de las propensiones, conectando cada escena (o catálogo) con la siguiente, serán leyes de un carácter determinista o casi clásico (como la ecuación dependiente del tiempo de Schrödinger).

Creo que esta nueva imagen, aunque quizá sea un poco compleja, representa adecuadamente el status de la teoría cuántica y su relación con la teoría clásica.

Pero ¿qué ventaja tiene esta imagen más compleja sobre nuestra primera modificación? Sobre todo, ¿qué ventaja tiene sobre el procedimiento, usado anteriormente, de atribuir probabilidades a las escenas clásicas para recordarnos que su utilidad es decreciente? Una ventaja se ve enseguida. Supongamos que la escena clásica que representa el mundo dentro de una semana, ha obtenido, sobre la base de nuestro procedimiento, una probabilidad de 0,7 (que significa aquí una *tasa media de acierto* en predicciones similares hechas con una semana de antelación en el pasado) y consideremos *a)* una previsión meteorológica basada en ella y *b)* una predicción de eclipse. Está claro que la previsión del tiempo será menos fiable y la predicción del eclipse lo será más de lo que esta tasa media de acierto indica. Nuestro nuevo método puede discriminar plenamente entre esos casos: un posible suceso —en contraposición a un posible estado del mundo— obtendrá una probabilidad igual a la suma de las probabilidades de todos los estados posibles que contienen ese suceso. Así, si conseguimos nuestro propósito con la idea de atribuir pesos a todos los estados posibles, entonces, la probabilidad del eclipse o de su no-ocurrencia puede hacerse mucho más elevada y la de una cierta situación meteorológica o de su no-ocurrencia puede hacerse mucho menor que la probabilidad de 0,7 atribuida a la escena clásica en cuestión. Esto muestra

[26] [*(Añadido en 1981.) Puesto que cada «escena» de la tira de película vinculada a una lámina de tiempo real consiste en un catálogo completo de estados posibles ponderados, mi propuesta implica realmente que las tiras de película predictoras se dividen con cualquier interacción en tantas tiras como posibilidades hay en el catálogo. En esto, mi imagen —esta sección se escribió en 1954 ó 1955— se asemeja mucho a la de Everett; sólo que los muchos mundos continúan siendo simples posibilidades en lugar de hacerse reales. Véase mi discusión sobre Everett en la «Introducción», sección 5.]

que la nueva modificación puede dar mejores resultados que la anterior.

Consideremos ahora algunos de los problemas planteados por nuestra nueva imagen —la sustitución de las tiras de película clásicas por un catálogo de posibilidades ponderadas. El principal problema es, desde luego, la determinación de esos pesos o probabilidades; o, en otras palabras, el descubrimiento de las leyes que nos permiten conectar una escena —es decir, un catálogo ponderado, una distribución de probabilidades en el espacio de posibilidades— con la siguiente. Este problema nos impone la tarea de determinar las probabilidades de transición por medio de una generalización de las leyes clásicas dinámicas de la naturaleza.

Esta es la tarea que la teoría cuántica trata de realizar. La teoría cuántica, como dijo Einstein en una ocasión, «destronó a la física clásica en lo que respecta a su aplicación al caso de masas suficientemente pequeñas...; de modo que hoy, las leyes del movimiento formuladas por Galileo y por Newton pueden considerarse válidas sólo como casos restrictivos» [27].

Hasta aquí estaba claro incluso antes de 1925. El problema era qué podía conservarse de las viejas leyes de la dinámica. La teoría de Bohr, Kramer y Slater de 1924, basada en ideas intuibles con las que mi imagen actual está profundamente endeudada en muchos aspectos, suponía que incluso las leyes de la conservación del momento y la energía eran válidas sólo para las medias estadísticas. Esta concepción fue refutada por los experimentos de Bothe y Geiger; y así, se desarrolló la nueva teoría cuántica de 1925-26, vinculada a los nombres de Heisenberg, Born, Jordan, Dirac y Schrödinger, teoría que satisfacía las leyes clásicas de la conservación.

Además, la teoría de Schrödinger era «clásica» en el sentido de que, *respecto a las propensiones,* era determinista *prima facie: determinaba* las distribuciones de las propensiones; y era reversible en el tiempo. Desde el punto de vista actual, esto es casi de esperar. Porque nos enfrentamos al siguiente problema: 1) tenemos que descubrir leyes que tengan una función análoga a las leyes clásicas dinámicas de la naturaleza pero que pongan en relación distribuciones de propensiones en vez de estados clásicos reales. Esto sugiere que las leyes deberían ser, si fuera posible, ecuaciones diferenciales que determinaran cambios de densidades, de pesos, de campos continuos (multidimensionales) de propensiones. 2) Tenemos que descubrir leyes que tengan un alto grado de simplicidad o contrastabilidad; pero ya sabemos que las leyes del tipo clásico, determinista *prima facie* son más sencillas y, por tanto, más fáciles de contrastar que otras leyes. 3) Nuestra exigencia de *indeterminismo* se satisface uniendo diferen-

[27] A. Einstein, *Mein Weltbild,* 1934, p. 173. (*Essays in Science,* p. 8.)

tes tiras de película a diferentes láminas de tiempo y sustituyendo las películas clásicas por películas de propensiones probabilísticas; así, *no necesitamos* que las leyes dinámicas que conecten las escenas estén más alejadas del tipo clásico. 4) Esto lo sugiere también la exigencia de que la física clásica sea una aproximación a la física cuántica (es decir, por el principio de correspondencia; *cf. Realismo y el objetivo de la ciencia,* tomo I del *Post Scriptum,* Parte 1, sección 15).

Pero volvamos a las leyes de la conservación. Su validez para procesos individuales sugiere que las partículas que no interactúan (y con más razón si son partículas no observadas —pero uno de mis objetivos principales es empujar a un lado todos los problemas relativos a la observación—) se comportan de modo clásico: una concepción que sostenía Einstein. Es la interacción de las partículas —incluidos los fotones— la que es indeterminista y especialmente la interacción entre partículas y estructuras de partículas tales como pantallas, ranuras, rejillas o cristales. Esas interacciones preservan las leyes de conservación; *pero las leyes de conservación no son suficientes como argumento en pro del determinismo.* Ello ocurre porque puede concebirse a las partículas, no como bolas de billar, sin como agentes con propensiones probabilísticas a interactuar (con diversas inclinaciones). Así pues, suponemos, con Dirac, que una partícula que se aproxima a un polarizador tiene una cierta propensión a pasar por él y una propensión complementaria a no pasar por él. (Es toda la situación la que determina esas propensiones, naturalmente.) No hay necesidad de atribuir este indeterminismo a una falta de exactitud o nitidez en el estado de la partícula o a las relaciones de indeterminación: éstas surgen, más bien, como relaciones de dispersión a consecuencia del hecho de que la interacción determinista sea sustituida por propensiones. Esta perspectiva no sólo sustituye la creencia errónea de que la indeterminación es «debida» (o, más bien, «debida» en parte) a nuestra interferencia, a nuestras mediciones, etc., sino que además la explica, hasta cierto punto. Porque toda medición se basa en la interacción de las partículas; y por tanto, creará dispersión, de acuerdo con la distribución de las propensiones. Pero lo mismo ocurre también en innumerables casos en los que no hay observador ni observación.

Todo esto muestra que la situación está estrechamente relacionada con la del paseo al azar del soldado (discutida más arriba, en la sección 10). De hecho, estamos ahora en una posición que nos permite construir algo parecido a un modelo sumamente simplificado del indeterminismo teórico-cuántico, por el sencillo mecanismo de introducir más de un soldado.

25. UN MODELO APROXIMADO DE INDETERMINISMO TEORICO-CUANTICO

Tomamos una dehesa o un campo muy grande, rodeado por una tapia y distribuimos por él a un grupo de soldados numerados consecutivamente, cada uno de ellos equipado con una ruleta de bolsillo con una aguja giratoria simétrica cuyos dos extremos no son distinguibles. Se ordena a cada soldado caminar en línea recta con velocidad constante hasta que llegue a una distancia de cinco pasos de la tapia o de otro soldado. Si es de la tapia, el soldado continúa su movimiento como si fuese una bola de billar que rebotara en la pared. Si se trata de otro soldado, entonces el que tiene un número más alto consulta su ruleta, y después de esta consulta —sin pérdida de tiempo— se aleja en una de las dos direcciones opuestas indicadas por la ruleta. Su dirección y velocidad y también la dirección y velocidad del otro soldado, deben determinarse de tal forma que juntas satisfagan las leyes de conservación del momento y la energía; lo que es siempre posible.

Nuestro modelo muestra, primero, que las leyes de conservación no entrañan determinismo, sino que dejan una de las variables abierta a la elección o a su determinación por el azar. (Esto no ocurre, naturalmente, en el caso del impacto elástico de bolas de billar macroscópicas.) En segundo lugar, muestra que, desde el primer encuentro de dos soldados, cuando la predeterminación original de sus movimientos se destruye, tenemos que operar con catálogos de posibilidades que pueden representarse gráficamente como ondas en expansión *(cf.* sección 10, más arriba).

El tercer punto es éste: supongamos que para determinar la posición de un soldado es necesario disponer un encuentro con él. Entonces, nuestro modelo muestra que toda determinación de la posición de un soldado interferirá de modo impredictible con su momento. Hay que admitir que este tercer punto está todavía *muy alejado de las relaciones de indeterminación de Heisenberg;* pero indica el modo en que la interferencia del observador con el objeto puede comprenderse como algo *sin importancia fundamental* —como una *consecuencia* de las leyes predominantes de la interacción y, por tanto, de ningún modo capaz de explicar esas leyes o su carácter indeterminista.

El cuarto punto que ilustra nuestro modelo es éste: consideremos uno de dos soldados que están a punto de encontrarse, y tratemos de calcular su propensión a localizarse, diez minutos después del encuentro, en una región determinada del campo. Está claro que esta propensión dependerá de la *situación total:* todos los soldados colocados de tal forma que puedan encontrarse con nuestro soldado en esos diez minutos influenciarán el resultado de nuestro cálculo. Las cambiantes posibilidades, o propensiones, de su localización influirán, todas

ellas, en la propensión que tratamos de calcular, e interactuarán con ella.

Nuestro ejemplo es, por supuesto, demasiado simple para producir un caso análogo al del experimento de las dos ranuras. Pero puede usarse para ilustrar lo que significa que digamos que todo estado del sistema es una realización de las potencialidades determinadas por su estado inmediatamente anterior; y también puede usarse para ilustrar la idea de que a todo estado instantáneo, o lámina de tiempo del sistema, le corresponde una tira de película cuyas escenas son catálogos (o espacios) de posibilidades ponderadas y que cada una de esas tiras será suplantada por una diferente al ocurrir cualquier interacción entre las partículas (o al realizarse algunas de las posibilidades). Naturalmente, incluso una tira suplantada puede seguir siendo útil para muchas predicciones probabilísticas. Pero si podemos conseguir información posterior lo haremos y así «reduciremos el paquete de ondas» [28].

26. MATERIA Y CAMPO

El sueño más querido de Einstein, quizá, durante cuarenta años, fue construir una teoría unificada de campos —una teoría de campos en la que el dualismo de materia y campo fuese superado y en la que las partículas fuesen explicadas como resultantes de las propiedades

[28] Me parece que merece la pena advertir, en este contexto, que la *teoría de Descartes del libre albedrío* estaba basada en su creencia de que aunque la «cantidad de movimiento» se conservaba (sin duda, una anticipación intuitiva del principio de energía), no se conservaba la dirección: esa es la razón de que se considerase, generalmente, que el descubrimiento de la ley de conservación del momento refutaba su concepción de que la mente inmaterial pudiera ejercer dominio sobre la dirección del movimiento (aunque no sobre su cantidad). Pero si introducimos (al menos) *dos* partículas, entonces las leyes de conservación del momento y la energía no determinan plenamente, en efecto, su dirección, aunque sí determinan plenamente, en efecto, su dirección, aunque sí determinan, después de que se haya elegido la dirección de una de las partículas, la velocidad de ambas y la dirección de la segunda. Ahora bien, lo que hace un animal en movimiento es precisamente eso: escoger su dirección. Puede hacerlo, en la mayoría de los casos. Su elección de velocidad, suele estar limitada: es decir, por la energía muscular de que dispone, por la aceleración máxima que puede desarrollar de modo indirecto y, por tanto, por el principio de energía. (Si tomamos al animal como una de las dos partículas, entonces, la segunda partícula, cuya presencia hace posible que se cumpla la ley de conservación del momento, es, por lo general, la tierra.) No creo que con esto se viole ninguna ley física; ni que las leyes físicas basten para determinar todos los movimientos animales —tales como los de mi mano mientras guía mi pluma—. Dicho de otro modo, me parece que la idea de Descartes era fundamentalmente correcta, aunque su física, naturalmente, necesita rectificaciones. [*(Añadido en galeradas.) Ahora descubro que Schrödinger dijo hace ya mucho tiempo (en 1922): «... el teorema de la energía y el momento nos proporciona sólo cuatro ecuaciones, dejando así los procesos elementales indeterminados en gran medida...». *Cf. Science Theory and Man,* 1957, p. 143.]

del campo—. El objeto de una teoría de este tipo es, naturalmente, la deducción de las *propiedades físicas* de las partículas —su estabilidad o inestabilidad, sus leyes de movimiento, su interacción mutua y su interacción con el resto del campo—, a partir de las ecuaciones supuestas del campo. El programa original de Einstein no les parece ya muy esperanzador a muchos físicos. Esto, creo, se debe en parte a la larga adhesión de Einstein al determinismo, y en parte al hecho de que su idea de un campo —que proviene de Faraday— es diferente de la idea a la que ha dado lugar la teoría cuántica: la idea de campos que determinan probabilidades (que han de interpretarse, desde mi perspectiva, como propensiones).

Un campo de Faraday o de Einstein puede concebirse como tan «real» —o casi tan «real»— como un electrón o una piedra de Johnson: tal campo puede «recibir patadas y las devuelve» (por citar a Landé). De hecho, la explicación física actual sobre dar y recibir patadas es (en una primera aproximación), en general, la de dos campos de Coulomb dándose patadas mutuamente. Los campos de probabilidades o propensiones son cosas más abstractas. Pueden ser creados (por una disposición experimental), pero no pueden recibir patadas y no pueden darlas [29]. Sin embargo, una patada experimental puede corresponder a una disposición cuyo campo determine una alta probabilidad de devolución de la patada. Puesto que puede hacerlo y puesto que se nos ha llevado a suponer que las posibilidades —sucesos virtuales— pueden influenciarse mutuamente e influir así en los resultados finales, propongo que consideremos los campos de posibilidades como «reales» —como multiplicidades de propensiones «reales», objetivas, aunque virtuales—. Pero como no pueden recibir patadas y no las devuelven, tendrán que concebirse de algún modo, como menos «reales» y más «abstractos» que las partículas de los campos de Faraday o de Einstein.

Otro aspecto de la evolución más reciente parece señalar en una dirección muy diferente de aquélla a la que apuntaba Einstein con su teoría unificada de campos. Einstein trató de construir una teoría en la que los dos tipos de campos que la física tomaba en consideración en aquel tiempo —el campo electromagnético de Faraday y Maxwell y el propio campo gravitatorio de Einstein— fuesen sustituidos por un solo campo. Este programa concreto de unificación estaba estrechamente relacionado con lo que puede llamarse la teoría eléctrica de la materia: la creencia, en resumen, de que la materia era una forma de energía eléctrica.

En su forma más sencilla, esta teoría trataba de explicar la masa de los electrones y protones como debida al contenido de energía del

[29] [Esta concepción data probablemente de 1954. Más tarde fue revisada por Popper. Véase su Introducción a este tomo, tesis 8. *Ed.*]

campo electrostático que los rodeaba; y de esta forma, en cualquier caso, la teoría tuvo que ser abandonada como refutada al descubrirse por primera vez una partícula material neutra, el neutrón. (Ha vuelto a ser refutada de nuevo cada vez que se ha descubierto una partícula material neutra. Desde luego, esos descubrimientos constituyen refutaciones sólo si suponemos que esas partículas neutras son «elementales», es decir, no compuestas.)

Con el abandono de la teoría eléctrica de la materia, el programa concreto para una teoría de campos unificada que Einstein había contemplado, perdió plausibilidad. De hecho, con cualquier nuevo tipo de partícula (tanto neutra como cargada) la teoría cuántica actual asocia un nuevo tipo de campo cuantizado: en lugar de una fusión de dos campos en uno, ahora tenemos tantos tipos de campos diferentes como tipos de partículas diferentes. Alcanzaban, como mínimo, el número de dieciséis en 1957 (si siempre asociamos un tipo de campo con dos partículas —es decir, con una partícula y su antipartícula—).

En todo caso, la idea fundamental de una teoría unificada de campos me parece a mí que no puede abandonarse —a menos, claro, que se proponga una teoría unificada alternativa y que lleve a resultados de éxito—. Porque la situación actual —la de una multitud de teorías de campos— parece insatisfactoria en diversos aspectos. Hay que admitir que ha llevado a predicciones cuantitativas muy satisfactorias en electrodinámica —la teoría probabilista de la interacción de un campo de positrones y electrones (una «agrupación» de electrones y positrones) con un campo de fotones (una «agrupación» de fotones). Pero fuera de la electrodinámica, las predicciones derivadas de la teoría actual son principalmente cualitativas; lo que significa que la teoría no puede ser contrastada satisfactoriamente.

Además, la situación es insatisfactoria incluso dentro de la electrodinámica, a pesar de sus éxitos predictivos. Porque la teoría, tal como está, no es un sistema deductivo. Es, más bien, algo que está entre un sistema deductivo y una colección de procedimientos de cálculo de un carácter algo *ad hoc*. Estoy pensando, sobre todo, en el llamado «*método de renormalización*»: actualmente, implica la sustitución de una expresión del tipo «lim *log x - lim log y*» por la expresión «lim *(log x - log y)*»; una sustitución para la que no se ofrece mejor justificación que la de que la expresión anterior resulta ser igual a $\alpha - \alpha$ y, por tanto, indeterminada, mientras que la posterior lleva a excelentes resultados (sobre todo, en el cálculo de la llamada variación de Lamb-Retherford). Debería ser posible, creo yo, o bien encontrar una justificación teórica para la sustitución, o, si no, sustituir la idea física de renormalización por otra idea física, una que nos permitiera evitar esas expresiones indeterminadas.

Pero más importantes que los defectos de este tipo, me parecen los métodos actuales de operar con treinta o treinta y dos tipos dife-

rentes de partículas fundamentales (contando las antipartículas) con las que se asocian quince o dieciséis tipos diferentes de campos.

Yo creo que hay unanimidad respecto al carácter insatisfactorio de esta situación; también sobre lo deseable de explicar, si es posible, las treinta y pico partículas como estados de un campo cuantizado y sus propiedades de desintegración por medio de probabilidades de transición (lo que se ha hecho en parte). Es un objetivo como éste el que hace urgente una teoría unificada de campos. El objetivo está determinado por un programa de investigación que a menudo se acepta implícitamente, aunque pocas veces se formula articuladamente.

Naturalmente, la forma habitual de considerar los campos y las partículas es esencialmente dualista; y muchos sostienen que este dualismo es un rasgo esencial de la teoría atómica. Esto no es sorprendente cuando consideramos que la idea de «asociar» un campo con una partícula ha demostrado ser muy fructífero, desde la teoría del fotón de Einstein a la teoría de De Broglie y Schrödinger del electrón y a la teoría de Yukawa del mesón. Y, sin embargo, este dualismo no parece bien fundado todavía, por muy útil que haya resultado para tratar problemas físicos. La interpretación estadística de Born, por ejemplo, es una teoría de partículas esencialmente monista *(cf.* sección 11, texto de la nota 17). Como indica Landé: lo que existen son las partículas; las ondas simplemente determinan la frecuencia con la que las partículas asumen cierto estado al repetir el experimento. De la misma manera, las teorías más recientes —que implican multiplicidad de campos cuantizados asociados a los diversos tipos de partículas (mencionados antes en esta sección)— son también, hay que resaltarlo, esencialmente teorías de partículas. Porque, esas teorías de campos son teorías estadísticas de *agrupaciones de partículas:* lo que describen son los números —o, más exactamente, las probabilidades de un cambio en los números— de las partículas en los diversos estados posibles; describen la probabilidad de «creación» o «destrucción» de partículas en esos estados («operadores de creación y destrucción») o, con una elección diferente de metáfora, la probabilidad de la transición de las partículas de un estado a otro.

Así pues, tanto si consideramos la teoría cuántica de Heisenberg, Schrödinger y Dirac, en la interpretación de Born, como si consideramos las teorías más recientes de campos cuantizados, realmente no parece haber fundamento para la aserción de que la teoría cuántica incorpora un dualismo de partículas y ondas: en todas esas teorías, las «ondas» juegan el papel, simplemente, de determinar las probabilidades de que las partículas adopten ciertos estados o de que experimenten transiciones de ciertos estados a ciertos otros estados.

Sin embargo, donde es probable que aparezca una auténtica teoría de campos (y una teoría de campos unificada) en oposición a una teoría de partículas, o una teoría de agrupaciones de partículas, es en

la explicación de las propias partículas. Esto lo presagió Schrödinger en su intento originario de explicar las partículas como crestas de ondas (o paquetes de ondas); y aunque ha abandonado esa teoría ha vuelto a menudo sobre el problema.

Una breve consideración de lo que puede hacer una teoría monista de campos —o cualquier otra teoría— quizá nos sea útil aquí. Como se ha indicado anteriormente, podría explicar, en el mejor de los casos, sólo *las propiedades físicas* de las partículas; dicho de otro modo, su *comportamiento físico,* o, aún más exactamente, su *disposición o propensión* a comportarse, en ciertas circunstancias, de cierta forma. Ninguna teoría física puede hacer más que esto: sólo puede describir un sistema físico describiendo sus propensiones. Así, las partículas son propensiones, desde el punto de vista de la teoría física; y es sólo *una cierta concepción metafísica* la que las ve de modo diferente —quizá como regiones del espacio que están, temporalmente, completamente «llenas» de algo y que son indivisibles.

Sugiero que abandonemos esta concepción metafísica y que la sustituyamos por otra igualmente metafísica: por la concepción de que las propensiones son reales; que son descritas por ecuaciones de campos; que las partículas pueden ser producidas por propensiones y que, al menos hasta cierto punto, las partículas *son* propensiones; de modo que son, en este aspecto al menos, lo que la teoría física nos dice —lo que posiblemente puede decirnos—. Podemos, de este modo, superar el dualismo de materia y campo sin sacrificar ninguna ventaja que pueda tener para el tratamiento y solución de problemas físicos. Porque, aunque sustituyamos este dualismo por un monismo de propensiones, retenemos, dentro de esta concepción monista, un tipo de dualismo práctico. Porque las propensiones son, por un lado, *potencialidades* y, por otro, son propensiones o potencialidades de *realizar* algo. Pero sea lo que fuere lo que sea realizado o lo que se realice por sí solo, debe, a su vez, ser un conjunto de propensiones o potencialidades de realizar algo una vez más.

Una teoría física de la materia que trate las partículas del modo indicado aquí, no es sólo un programa, o un sueño o un deseo, porque se logró hace muchos años en lo que respecta a los electrones positivos. Estoy pensando, obviamente, en la famosa teoría de Dirac —una de las partes más osadas e ingeniosas de la teoría cuántica—. Es una teoría que interpreta los electrones positivos como «agujeros» —es decir, como estados desocupados, como posibilidades abiertas para su ocupación—. El vacío (el espacio desocupado) es concebido por esta teoría como dotado de una estructura: está formado de electrones negativos que «ocupan» todos o casi todos los estados posibles de la masa y la energía negativas. (La existencia de dichos estados es una consecuencia de las ecuaciones de Dirac.) Después de asumir un estado de ese tipo, un electrón negativo desaparece, por decir-

lo así; pero permanece virtualmente presente, en la medida en que puede reaparecer en determinadas circunstancias si un cuanto de luz proporciona la energía necesaria para elevar al electrón a un nivel más alto de energía. Pero, simultáneamente, aparecerá un «agujero» —su estado anterior que ahora está desocupado— y la teoría predice que ese «agujero» se comportará exactamente igual que un electrón con carga eléctrica positiva: será repelido por las cargas positivas, atraído por las negativas y se «unirá» con un electrón negativo, con lo que tanto el «agujero» como el electrón negativo desaparecerán. Sus cargas y sus masas quedarán aniquiladas y convertidas en energía radiante (en un fotón). Los dos procesos inversos —la creación de un par de electrones, positivo y negativo, a partir del vacío, y la aniquilación de un electrón positivo y uno negativo— se explican así. La explicación es monista. Sólo hay *un* tipo de partícula implicada, la que conocemos como electrón negativo; y los dos procesos consisten en su adopción de diferentes estados, de diferentes niveles de energía. La otra partícula —la que conocemos como electrón cargado positivamente— resulta ser un «agujero» en el vacío: una posibilidad abierta, un estado desocupado que puede ser adoptado por un electrón negativo: una *propensión*.

El tipo concreto de monismo inherente a este enfoque —un monismo de electrones negativos— no es ya muy atractivo en nuestros días. Demasiadas partículas diferentes (por ejemplo, mesones) han sido descubiertas desde que lo fuera el electrón positivo, y no pueden ser explicadas de la manera descrita. Parece que ha pasado ya el tiempo en que había la esperanza de que fuera posible explicar la materia en términos de los estados de una o dos partículas fundamentales.

Lo que nos importa aquí es que la existencia del formalismo de Dirac demuestra la existencia de una teoría matemática que nos permite describir la presencia de una partícula material como equivalente a un «agujero», es decir, a una no-partícula, a un estado potencial pero «desocupado» de una partícula: a una pura posibilidad abierta a la interacción con otras partículas.

No parece haber ninguna razón por la que esas otras partículas no puedan, a su vez, ser matemáticamente equivalentes a posibilidades abiertas. Si lo son, debemos llegar a otro tipo de monismo —uno que interprete las partículas materiales a la vez como las *realizaciones o actualizaciones* de ciertas potencialidades (la creación de pares realiza ciertas potencialidades del vacío) y como *potencialidades de ciertos tipos de interacción* (tal como la aniquilación de pares, por ejemplo). Un formalismo que tratase a «partículas» y «agujeros» como totalmente equivalentes, satisfaría, hasta cierto punto, el programa de Einstein y de Schrödinger: explicaría las partículas de materia en términos de campos. Al mismo tiempo, satisfaría un programa que se ha esbozado aquí: un programa para una teoría del cambio que

sería monista y dualista al mismo tiempo; que nos permitiría interpretar cualquier estado del mundo real al mismo tiempo como una actualización o realización de algunas de las potencialidades o propensiones de sus estados precedentes y como un campo de disposiciones o propensiones a realizar el siguiente estado. De este modo, se mostraría que el aparente dualismo de materia y campo, de partícula y onda, surge del modo más natural de los dos aspectos fundamentales de toda cosa física. Me refiero a sus dos aspectos como *portador de disposiciones* —un *portador* que no puede tener propiedades contrastables más allá de esas *disposiciones.*

Una teoría como ésta podría dar lugar también al principio de que las partículas que representan las mismas posibilidades son idénticas (y con él, al principo de Bose).

27. PROBLEMAS ABIERTOS

Mi sueño de programa es metafísico. Es incontrastable: es irrefutable (y la irrefutabilidad, recordémoslo, no es una virtud, sino un vicio). Está basado en la idea metafísica (en vez de en la «científica») de indeterminismo [30]. Trata de suplantar, de sustituir, la interpretación metafísica existente de la teoría cuántica en términos de «partículas» defendida por Born contra Schrödinger; trata también de suplantar la interpretación instrumentalista de Bohr (que renuncia a cualquier intento de ir más allá del dualismo de onda y partícula y de explicarlo) y trata de proporcionar una perspectiva coherente del mundo físico —un mundo físico que no es ya una camisa de fuerza para sus habitantes, no es una jaula en la que estamos atrapados, sino un hábitat que podemos hacer más habitable para nosotros y para otros (y que, por cierto, estamos a punto de hacer inhabitable para nuestros hijos con lo que orgullosamente denominamos «el uso pacífico de la energía atómica» [31]).

---

[30] [Véase *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo,* tomo II del *Post Scriptum,* para la distinción entre indeterminismo científico y metafísico. *Ed.*]

[31] Aunque el tema es una digresión, podríamos reflexionar aquí sobre el hecho de que unos cuarenta mil años o más después de Prometeo, no hemos aprendido a dominar los peligros del «uso pacífico del fuego». La gente sigue muriendo por su causa, pacífica y regularmente, aunque su control no presenta dificultades inherentes y aunque, un niño que se quema, lo teme (a diferencia de lo que ocurre con las ampollas radioactivas extraviadas y otros «desperdicios atómicos»). Las construcción de bombas atómicas puede ser, en una situación política desgraciada, una desgraciada necesidad; pero ¿puede decirse lo mismo de la mayor parte de los «usos pacíficos» de la energía atómica? Y, nuestra prisa por desarrollar este «uso pacífico» ¿está libre de la idea historicista de que avanzamos hacia una nueva era —«la era atómica»— y de otras necedades por el estilo?

Pero si mi sueño es metafísico, ¿cuál es su utilidad? ¿Hay algo en él más allá de, quizá, una satisfacción emocional? ¿No es totalmente diferente de una hipótesis científica —en la que estamos interesados principalmente *a causa de su pretensión implícita de ser considerada, tentativamente, como verdadera?*

Ya no creo, aunque hubo un tiempo en que lo creí, que haya diferencia entre la ciencia y la metafísica en este punto tan importante. Considero que una teoría metafísica es similar a una científica. Es más vaga, sin duda, e inferior en muchos otros aspectos; y su irrefutabilidad, o falta de contrastabilidad, es su mayor defecto. Pero *mientras una teoría metafísica pueda ser criticada racionalmente,* yo me inclinaría a tomar en serio su pretensión implícita a ser considerada, tentativamente, como verdadera. Me inclinaría a evaluarla, principalmente, por medio de una valoración de su pretensión, considerando, en primer lugar, su interés teórico y tomándome sólo un interés secundario por su utilidad práctica (distinta de su fecundidad como programa de investigación). La utilidad o falta de utilidad práctica puede considerarse importante, sobre todo, porque es algo parecido a una contrastación de la verdad —como puede ocurrir frecuentemente en relación con una teoría científica.

¿Pero es posible valorar o evaluar racionalmente una teoría irrefutable? ¿Qué sentido tiene criticar racionalmente una teoría si sabemos desde el principio que no es refutable por la razón sola ni contrastable por la experiencia?

Mi respuesta es ésta: Si una teoría metafísica es, más o menos, una aserción aislada, nada más que el producto de una intuición o una percepción que nos lanzan con un «o lo tomas o lo dejas» implícito, entonces, puede muy bien ser imposible discutirla racionalmente. Pero lo mismo ocurriría con una teoría «científica». Si alguien nos presentase las ecuaciones de la mecánica cuántica sin explicarnos primero *cuáles son los problemas* que tratan de resolver, entonces seríamos incapaces de discutirlas racionalmente —igual que si se tratase del *Apocalipsis*—. Incluso si nos presentan los argumentos de Newton, es posible que seamos incapaces de discutirlos a menos que nos hablen primero de los problemas de Galileo y Kepler y de sus soluciones y sobre el problema del propio Newton sobre cómo unificar esas soluciones haciéndolas derivar de una teoría más general. En otras palabras, cualquier teoría racional, sea científica o metafísica, sólo es racional porque está ligada a algo diferente, porque es un intento de resolver ciertos problemas; y puede ser discutida racionalmente sólo *en relación con la situación del problema* con el que está ligada. Cualquier discusión crítica de ella consistirá, principalmente, en considerar lo bien que resuelve sus problemas; cuánto mejor lo hace que las diversas teorías rivales; si no crea dificultades mayores que las que trata de resolver; si la solución es sencilla; cómo es de fructífera en

sugerir nuevos problemas y nuevas soluciones; y si no podemos, quizá, refutarla por medio de contrastaciones empíricas.

Este último método de discutir una teoría no es aplicable, desde luego, si la teoría es metafísica. Pero los demás métodos pueden muy bien ser aplicables. Por ello es posible la discusión crítica o racional de algunas teorías metafísicas. (Naturalmente, puede haber otras teorías metafísicas que no puedan discutirse racionalmente.)

Apenas es necesario dar aquí ejemplos de este método, porque este *Post Scriptum* está lleno de ellos. Puedo mencionar como ejemplos mi discusión crítica de las epistemologías idealistas y positivistas (en el tomo I, parte 1); de las epistemologías probabilistas (tomo I, parte 2); y de la metafísica determinista, tal como se encuentra en Hobbes, Hume, Kant y Einstein (en el tomo II).

Creo que mi sueño puede discutirse de este modo —sobre todo comparándolo con las perspectivas rivales a las que quiere suplantar—. La comparación debería ser en términos de simplicidad, coherencia con ciertas otras teorías, capacidad unificadora, atracción intuitiva y, sobre todo, fecundidad. Sin querer comprometerme con nada parecido al instrumentalismo o al pragmatismo, creo que consideraría la cuestión de la fecundidad de mi programa como decisiva. Si no lleva a nuevos problemas o, al menos, a una nueva evaluación de los grandes problemas antiguos aún abiertos, la descartaré: como un hermoso sueño (o al menos, eso me parece a mí) —hermoso, pero en el que no hay que complacerse.

No quiero dar aquí una lista de los problemas abiertos, bien conocidos, de la teoría de la materia (tal como el problema de la carga electrónica, o de la derivación del principio de exclusión) y de la cosmología general que (sueño yo) puede que algún día sea abordada a la luz de la metafísica del cambio que he propuesto aquí. Pero el problema del gran número, aún en aumento, de partículas elementales es uno que debe ser destacado a causa de su extrema urgencia.

En un tiempo, el programa de la moderna teoría atómica fue explicar el gran número de átomos *sólo* por medio *de dos partículas elementales,* el protón y el electrón; y tuvo su momento de mayor gloria cuando realizó ese programa —un programa que está ahora en ruinas—. El problema empezó hace muchos años, con la hipótesis *ad hoc* del neutrino. Se introdujo *ad hoc* para evitar la derrota, un procedimiento correcto en el caso de una teoría de mucho éxito, mientras haya alguna esperanza de obtener algún día evidencia independiente para la suposición *ad hoc.* Pero, si no me equivoco, esta hipótesis sigue siendo *ad hoc,* igual que hace treinta años [32]. El neutrino, sin embargo, es poca cosa, comparado con todas esas otras partículas que han tenido que introducirse desde entonces, debido a lo apre-

---

[32] [*(Añadido en 1981). Así era cuando se estaba escribiendo este libro.]

miante de la evidencia, sobre todo los diversos mesones; porque hicieron tambalearse las concepciones de la estructura de la materia que habían sido el fundamento de la teoría cuántica. Hay que admitir que esas concepciones no formaban parte del formalismo matemático; pero formaban parte, no obstante, de la teoría física.

Lo que hace falta es una teoría de la materia que explique las masas de todas esas partículas y su estabilidad o inestabilidad a partir de principios generales [33]. La exigencia de Einstein de una teoría unificada es una exigencia necesaria, una exigencia que no puede desecharse como una simple quimera, o como una ilusión destruida por la teoría cuántica [34]. La teoría de cambiantes *campos de propensiones* puede ofrecer una forma de unificación.

A medio camino entre la teoría atómica y la cosmología propiamente dichas, está la teoría de la creación de la materia, debida a Jordan, Gold, Hoyle, Bondi y McCrea, que, en intención al menos, es una mera conjetura científica más que una teoría metafísica (aunque por el momento no parece contrastable). [*Desde entonces, no sólo se ha hecho contrastable, sino que parece haber fracasado en la contrastación.] Pero supongamos una teoría propensivista de la materia, como la esbozada en la sección precedente, e interpretemos el espacio (espacio de «posición», *topos)*, siguiendo las sugerencias de Leibniz y Einstein, como el campo «de las relaciones mutuas posibles entre... los cuerpos» [35]; es decir, de las propensiones de las partículas materiales a estar colocadas entre otras partículas. (También es, según la teoría de Dirac, un campo de estados ocupado por pares latentes de partículas de materia y capaz de polarizarse.) La expansión del universo podría entonces interpretarse como la expansión de este campo de propensiones. Al crear esta expansión nuevas posibilidades y, por tanto, nuevas propensiones de que la materia esté presente (algunas de las cuales se realizarán), podría explicar así la creación de nueva materia; porque puede identificarse la materia con la realización de esas propensiones. Así, un universo en expansión podría crear materia simplemente como una función de su expansión (quizá, tal como lo sugiere la teoría del estado constante).

A este respecto, quiero llamar la atención sobre la conjetura de Kapp de que todas las partículas materiales tienen una vida limitada de modo que las grandes acumulaciones de partículas (estrellas, planetas) actuarían como un «vertedero» para la materia (y, por tanto, según el supuesto que acabamos de esbozar, también para el espacio);

---

[33] M. Born y H. S. Green han propuesto una teoría de campos que trata de explicar las masas de las partículas (pero no, que yo sepa, la longitud de su vida); *cf.* M. Born, *Rev. Mod. Phys.*, 21, 1949, pp. 463-473.

[34] Esta era la tesis de W. Heisenberg en *Dialectica*, 2, 1948.

[35] A. Einstein, *Mein Weltbild*, p. 179; *cf. Essays in Science*, p. 14.

una conjetura que, como sugiere Kapp, podría llevar a una teoría geométrica de la gravitación, similar a la de Einstein [36].

Hay algunos problemas cosmológicos que están estrechamente relacionados con la idea de un mundo indeterminista. Esta idea implica, por ejemplo, la distinción entre un *pasado cerrado* y un *futuro abierto* y con ella una dirección objetiva del tiempo. En nuestra imagen de las tiras de película probabilísticas o no clásicas, cada una de las cuales está ligada a una lámina de tiempo de un universo indeterminista, podemos decir que incluso aunque las ecuaciones que determinan los cambios dinámicos de las propensiones en las películas pueden ser simétricas respecto al tiempo, nuestra teoría no lo es. Porque nuestra teoría es más que esas ecuaciones: consiste en las ecuaciones más su interpretación en términos de propensiones, y esa interpretación es asimétrica con respecto al tiempo. La idea de propensión distingue entre las posibilidades no realizadas del futuro y las realizaciones presentes y pasadas.

Esto queda claro en ciertos aspectos de la teoría cuántica que he discutido en *La lógica de la investigación científica* y en este *Post Scriptum. (Cf. L.I.C.,* sección 73, nota 5 y texto, y sección 16 de este tomo del *Post Scriptum.)* Como hace notar Heisenberg, es posible calcular, con ayuda de ciertas mediciones, por ejemplo, de dos posiciones de un electrón, la trayectoria espacio-temporal entre esas dos posiciones —su *momento y también sus diversas posiciones*— con cualquier grado de precisión que se desee. Heisenberg añadió que era «una cuestión de creencia personal si a ese cálculo relativo a la historia pasada del electrón puede atribuírsele realidad física o no» [37]. Mi propia investigación llevó a un resultado diferente: en mi interpretación, esos cálculos eran *necesarios para contrastar* las fórmulas de Heisenberg, interpretadas como relaciones de dispersión, y, por tanto, estaban muy lejos de oponerse a ellas. Pero las relaciones de dispersión impiden que se hagan cálculos similares sobre el futuro. Así pues, todos convenimos en que el futuro está abierto; y el hecho, mencionado por Heisenberg, de que podemos calcular el pasado como determinado, o cerrado, muestra claramente que incluso en la interpretación de Hei-

[36] *Cf.* R. O. Kapp, *British Journal for the Philosophy of Science,* 5, 1955, pp. 331 y ss.; y 6, 1955, pp. 177 y ss., donde se dan otras referencias. (A ellas, habría que añadir, P. Jordan, *Naturwiss,* 26, 1938, p. 417; *Astr. Nachr.,* 276, 1948, p. 193.) No puedo evitar la sensación de que sería preferible no hablar de una «simetría» entre la creación de materia y la extinción de materia; en un universo en expansión, al menos, parece que la creación de materia tendría que mantener constante la densidad media de la materia, de modo que cualquier destrucción de materia tendría que llevar a un incremento en la tasa de creación de materia, más que a una tasa simétrica o correspondiente de creación de materia. Además, las dos tasas, la de creación y la de destrucción, dependerían de factores enteramente diferentes: la primera, de los cambios de densidad, la segunda, simplemente, del tiempo.

[37] W. Heisenberg, *The Physical Principles of the Quantum Theory,* 1930, p. 20.

senberg hay asimetría en esto. En la interpretación propensivista, la situación es perfectamente clara. Las propensiones futuras están determinadas en cada instante, *pero sólo las* propensiones. (Esta es la razón de que sean aplicables las relaciones de dispersión.) Al irse realizando esas propensiones, en la forma de partículas con posiciones y momentos, las posibilidades abiertas se cierran. Así, la posibilidad de cálculo de las realizaciones pasadas y presentes, difiere de la del futuro. Aunque cualquier lámina de tiempo *dada* no nos permita determinar el pasado igual que no nos permite determinar el futuro, las sucesiones de láminas de tiempo *dadas* sí que determinan el período entre sus primeros y sus últimos elementos. *Pero cualquier sucesión de ese tipo sólo puede pertenecer el pasado.*

La idea de un mundo indeterminista atañe a otro problema, y ofrece una solución para él. Se trata de un problema que se ha mencionado en este *Post Scriptum* —el problema de Gödel de la existencia de líneas-mundo cerradas en ciertas soluciones cosmológicas de las ecuaciones gravitatorias de Einstein; es decir, en universos rotatorios [38]. La historia de un cuerpo físico moviéndose en una línea-mundo cerrada sería repetitiva, absoluta e infinitamente repetitiva. Pero eso sólo es posible en un universo determinista. La suposición de un universo indeterminista excluye, por tanto, esta posibilidad; o, más bien, le atribuye la probabilidad 0, cualesquiera que sean las condiciones iniciales.

Desde nuestro punto de vista es interesante destacar que la exclusión de esta posibilidad por el indeterminismo no es, desde luego, *ad hoc* [39]. Pero lo que parece aún más interesante es el hecho de que, suponiendo que las ecuaciones cosmológicas de Einstein sean verdaderas (una suposición que parece compatible con nuestra versión del indeterminismo), la exclusión de las soluciones contempladas por Gödel equivale a la exclusión de ciertos modos de disposición de la materia en el mundo y de su movimiento en él [40]. Esto muestra, sorprendentemente, que *una hipótesis como la del indeterminismo puede tener consecuencias estructurales:* que la hipótesis del indeterminismo puede ser capaz de excluir ciertas disposiciones de la materia y el movimiento en el mundo. Este hecho es interesantísimo en vista de lo que he llamado «el problema de Newton» (véase *Realismo y el objetivo de la*

---

[38] K. Gödel, «A Remark about the Relationship between Relativity Theory and Idealistic Philosophy», en P. A. Schilpp ed., *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, pp. 555 ss.; y *Rewiews of Modern Physics*, 21, 1949, pp. 447-450. Véase también *El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo*, vol. II de este *Post Scriptum*, nota 16, sección 19.

[39] Este hecho parece resolver el problema de Gödel. La sugerencia de Gödel de que la solución estriba en rechazar el realismo y adoptar el idealismo, no me parece ofrecer una salida a esta dificultad.

[40] K. Gödel, *op. cit.*, p. 562.

ciencia, tomo I del *Post Scriptum,* parte 1, sección 16). Sugiere que puede no ser totalmente imposible hacer ciertos avances en relación con ciertos aspectos del problema, aunque puede muy bien ser insoluble en lo principal. Pero la exclusión, por medio de la atribución de una probabilidad cero, de ciertas distribuciones iniciales de la materia y del movimiento tiene aún otra consecuencia interesante: muestra que en un universo indeterminista puede haber ciertos principios probabilísticos de inexistencia que excluyen posibilidades que desde el punto de vista de una teoría determinista clásica aparecerían como típicamente contingentes —posibilidades con el carácter de condiciones iniciales, más que con el de leyes *(cf. L.I.C.,* Apéndice *x).

28. CONCLUSION

El programa metafísico de la interpretación propensivista podría resumirse, en el lenguaje conciso de los cosmólogos jónicos, en el enunciado: «Todo es propensión.» O, en la terminología de Aristóteles, podríamos decir: «Ser es tanto ser la actualización de una propensión previa a llegar a ser, como ser una propensión a llegar a ser.» Es una concepción que une aspectos de todos esos programas metafísicos enumerados en la primera sección de este Epílogo (sección 20), como se verá en la lista siguiente.

1. Como con Parménides, el mundo está lleno —en el sentido de que el vacío tiene una estructura y es, él mismo, un campo de propensiones que son reales.

2. Como con los atomistas, la estructura de la materia es atómica, y el dualismo entre lo lleno y lo vacío —o entre materia y espacio o campo— es, hasta cierto punto, conservado, como una distinción entre la realización de una propensión y la propensión a realizar. (Véase también la posición 10, más abajo.)

3. Como con Platón y Euclides, el énfasis en la geometría se conserva; y también la cosmología geométrica: en este aspecto, la cosmología no-euclidiana, como cosmología, es más euclidiana que Euclides, porque la geometría como tal se utiliza incluso para describir la distribución de la materia en el mundo.

4. La concepción aristotélica de las potencialidades inherentes y su actualización se desarrolla en la forma de una teoría *relacional* en la que las estructuras de relación, en lugar de ser inherentes a cada cosa material, pueden caracterizarse como potencialidades.

5. El enfoque geométrico (platónico) del Renacimiento se conserva también, así como el método hipotético de Platón y su énfasis en las causas antecedentes.

6. La teoría de los fluidos (el calor, por ejemplo) de los cartesianos y de Boyle se conserva en la forma de ley de la conservación de la energía. Su acción a distancias decrecientes se conserva en la forma de teoría de campos.

7. La teoría propensivista puede describirse como una generalización del dinamismo.

8. Las fuerzas centrales (que corresponden a las potencialidades inherentes de Aristóteles) dan lugar, como con Faraday y Maxwell, a campos de potencialidades de un carácter relacional.

9. Como en el programa de Einstein y Schrödinger, las leyes dinámicas del cambio de esos campos de propensiones son de carácter determinista *prima facie* (como las leyes de una teoría clásica). Además, las propensiones —incluso aquéllas que para su representación geométrica necesitan un espacio abstracto multidimensional de posibilidades— son tratadas como realidades físicas[41]. Estos dos puntos, una realidad física descrita por medio de leyes deterministas

---

[41] Heisenberg *(Niels Bohr and the Development of Physics,* editado por W. Pauli, 1925, p. 24) nos dice que las ondas de probabilidades en el espacio de configuración no son reales, según la interpretación ortodoxa de Copenhague, a la que él llama la «interpretación habitual». Así pues, el «dualismo de partícula y onda» se desbarata aquí: sólo es válido si las ondas están en el espacio tridimensional. El pasaje (de hecho, todo el artículo) es interesante, aparte de otras cosas, por sus extrañas sugerencias, que traen reminiscencias del psicoanálisis, de que los que critican la interpretación de Copenhague «carecen de información» (*cf. Realismo y el objetivo de la ciencia,* tomo I del *Post Scriptum,* parte 1, sección 18) sobre la esotérica enseñanza de la ortodoxia. «Ahora bien, la obra de Schrödinger —escribe Heisenberg—, en primer lugar, contiene ciertos errores sobre la interpretación habitual. Ignora el hecho de que sólo las ondas en el espacio de configuración... son ondas de probabilidades en la interpretación habitual, mientras que las ondas materiales, tridimensionales, u ondas de radiación, no lo son. Las últimas... tienen tanta (y tan poca) "realidad objetiva" como las partículas; no tienen relación directa con las ondas de probabilidades...» No sé si Heisenberg pretende conceder que las ondas de Schrödinger para una o dos partículas son tridimensionales, y por tanto «reales» (pero no las ondas para tres partículas), o si sólo tiene en mente la «segunda cuantización»; pero, en todo caso, la concepción de Heisenberg me parece tomar la tridimensionalidad una pizca demasiado en serio (si dice en serio lo que parece decir en este asombroso artículo). Después de todo, las representaciones multimensionales son sólo formas de expresar cosas; lo que representan —las propensiones y sus leyes— son tan reales como lo que representan las ondas tridimensionales. Porque está claro que es la misma cosa, que se representa por los dos métodos. No hay diferencia en el asunto —ni siquiera en el pretendido asunto—, sino sólo entre dos métodos que lo representan con mayor o menor éxito.

y una realidad a la que es aplicable la idea de campos (de modo que las leyes son ecuaciones diferenciales parciales), eran las principales ideas de Einstein para una teoría unificada del mundo. Se conservan.

10. El punto de vista de la interpretación ortodoxa de la teoría cuántica, incluido su «dualismo» de campo y partícula o de onda y partícula, es reinterpretado y conservado en términos del dualismo de las potencialidades y sus actualizaciones que, a su vez, son también potencialidades. (Esta concepción trasciende el viejo dualismo de una forma postulada a menudo por Einstein.) El carácter probabilístico de la teoría, especialmente resaltado por Born y Pauli, también se conserva.

Así pues, todos los programas anteriores se convierten en aproximaciones desde el punto de vista de esta teoría metafísica de las propensiones. Todos los programas aportan algún aspecto que otro a nuestra concepción metafísica.

En particular, la disputa entre las dos últimas posiciones de mi lista, entre Einstein y Schrödinger por un lado y los que, como Pauli, sostienen la interpretación esencialmente estadística de Born de la teoría cuántica, por otro, se resuelve por medio de la interpretación propensivista: a Einstein y Schrödinger les ofrece una realidad física a la que son aplicables las ecuaciones de campos del tipo determinista clásico, y a Born le ofrece una interpretación probabilística de esas ecuaciones.

La interpretación propensivista le debe todo a Einstein. Y, no obstante, dudo mucho que él hubiera estado dispuesto a aceptarla. Lo que se hubiera interpuesto no hubiera sido sólo su determinismo *(cf. El universo abierto: Un argumento en favor del indeterminismo,* tomo II del *Post Scriptum,* sección 26), sino también su actitud hacia la probabilidad, que era, sin duda, una de las consecuencias de su determinismo. Esta actitud había sido fundamentalmente subjetivista e implicaba el supuesto habitual de que las frecuencias estadísticas pueden derivarse de una teoría subjetivista. (Hay una estrecha similitud en este punto entre las concepciones de Einstein y las de sus oponentes que, al parecer, nunca consiguieron sacudirse los residuos de un pasado determinista.) Cuando digo que la interpretación propensivista se lo debe todo a Einstein, estoy pensando en su doctrina de que el objetivo de la física es la descripción de la realidad física en términos de ecuaciones de campos. Al mismo tiempo, él fue el primero que operó con probabilidades de transiciones, es decir, con *probabilidades singulares, relativas a un solo átomo* y proporcionales a la densidad de la radiación [42]. Al final del artículo en que desarrolló esta concep-

[42] A. Einstein, *Physikalische Zeitschrift,* 18, 1917, pp. 121-28.

ción, resaltó la tarea de establecer un vínculo entre la teoría ondulatoria de Maxwell y esta nueva teoría suya que, decía él, «deja al azar tanto el instante como la dirección de los procesos elementales» de emisión. Algún tiempo después relacionó las ideas de Bose y de De Broglie sugiriendo que, igual que es posible tratar a los fotones estadísticamente como partículas de un gas, también debe ser posible asociar un campo de ondas con un gas [43]. En este contexto, es interesante enterarse en un informe de Bohr, de que, en 1920, Einstein describió la situación en física, creada por su teoría del fotón (y por las refutaciones de la teoría de Maxwell implícitas en el éxito del modelo de Bohr) hablando de «campos fantasma que guían al fotón» [44]; los espíritus o espectros de las difuntas ondas electromagnéticas eran todavía algo real (puesto que seguían siendo responsables de los espectros y, esencialmente, de las rayas del espectro). Pero, aunque Einstein anticipó prácticamente la teoría propensivista, no creo que le hubiese gustado. (Para otras anticipaciones, véase sección 12.)

Una sorprendente ventaja de la interpretación propensivista es que parece, si puedo usar las palabras de Pauli, «dar esperanzas de un desarrollo futuro de las diferentes ramas de la ciencia hacia una mayor unidad» [45]. Pauli habla aquí de la teoría cuántica en general, con sus leyes probabilísticas; y sin duda, las diferentes ramas de la ciencia que él tiene en mente son las ciencias biológicas (véase también la nota 21 de la sección 21), y, en último término, las ciencias del hombre. Creo que sus esperanzas están justificadas y más aún a causa de la interpretación propensivista. Los biólogos siempre han trabajado con propensiones —incluso cuando sus prejuicios mecanicistas les impedían reconocerlo—. La interpretación propensivista de la física puede contribuir a la desaparición de esos prejuicios y dar así aliento a una mayor fertilización mutua entre las ciencias físicas y las biológicas. Tomemos el caso de la afinidad química. Podemos decir ahora, a la luz de su explicación mecánico-cuántica, que es una propensión física y que la intuición de que en muchos aspectos era semejante a ciertas propensiones biológicas, estaba justificada: no nos enfrentamos aquí a una simple analogía, sino, más probablemente, a un auténtico caso de transición, intermedio. El propio término «propensión» es, desde luego, un término biológico o psicológico. (También se usa en economía, exactamente en el mismo sentido en que yo sugiero que se use en física.)

---

[43] *Sitzungsberichte d. Preuss. Akad. d. Wissenschaften, Phys.-Math. Klasse*, 1925, pp. 3-14.

[44] La expresión de Einstein «Gespensterfelder» la traduce Niels Bohr como «ghost waves», ondas fantasma, en «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist, op. cit.*, p. 206.

[45] W. Pauli, «Einstein's Contributions to Quantum Theory», en *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, pp. 157 y ss.

Un caso especialmente interesante es el viejo problema de la organización de la materia viviente en individuos —plantas individuales, animales individuales—. Los organismos individuales de la biología con su extraño carácter de autarquía de largo alcance, se han comparado a menudo con los cristales; y, desde luego, podrían compararse con sistemas físicos que estén dotados de fuertes propensiones a retener su carácter de sistemas relativamente autárquicos, tales como los cristales, en cuyo caso, esas propensiones son probablemente explicables en términos de resonancia; o de núcleos atómicos cuyas asombrosas propensiones hacia la autarquía son ilustradas por la constancia de su tasa de radioactividad sobre la que no hace impresión ninguna condición ambiental que no sea un bombardeo de nucleones. Podríamos denominar a esas peculiares propensiones a la autarquía, con su sorprendente independencia de las condiciones ambientales, «*propensiones inherentes*» del sistema. Son relacionales, como lo son todas las propensiones, naturalmente; y, sin embargo, se parecen a las aristotélicas potencialidades inherentes de una cosa, más que otras propensiones físicas o biológicas. (Esto no es una casualidad: Aristóteles era biólogo.)

Finalmente, sólo dentro del marco de una imagen indeterminista del mundo, podemos tener la esperanza de entender el fenómeno del movimiento voluntario de los animales. *(Cf.* la nota al final de la sección 25, más arriba.) En biología pueden ocurrir muchas cosas, sobre todo en los animales, que, considerados desde su punto de vista físico, son de lo más inesperado e improbable. Que una pareja de golondrinas, después de volar largas distancias, vuelva siempre al lugar de su viejo nido, es difícil de explicar por medio de leyes físicas, y las leyes de conservación no sirven de gran ayuda en esto. Si la memoria puede dar lugar a esas cosas, debe guiar, de algún modo, los movimientos de esos animales de una forma similar a como la ruleta de bolsillo guiaba a nuestros soldados *(cf.* secciones 10 y 25); excepto que la ruleta es sustituida por una especie de piedra imán, de modo que el juego de azar es sustituido por una «propensión inherente». Apenas importa, para nuestro propósito actual, cómo funcionan esas cosas con detalle. Lo que importa es que funcionen y que parecen hacerlo como si ciertas propensiones inherentes se superpusieran (como, por ejemplo, en el efecto Zeeman) sobre ciertas otras propensiones físicas de un carácter más aleatorio o equi-probabilístico, dando con ello mayor peso a ciertas posibilidades: les imponen, por así decirlo, una desviación sistemática. Este parece ser el modo en que ocurren tantas cosas improbables en contextos biológicos. Lo que podemos ver ahora claramente es que este tipo de cosa (me refiero a la superposición de «propensiones inherentes») juega ya un papel, de una forma rudimentaria, en la física clásica (dados cargados, presión osmótica, resonancia); y, por tanto, podemos formarnos una idea intuiti-

va de cómo puede encajar en nuestro mundo físico y, al mismo tiempo, transcenderlo, superponiendo sobre él una jerarquía de finalidades —una jerarquía de desviaciones sistemáticas cuya finalidad va en aumento [46].

Nada de esto se ha dicho en el espíritu de una apología espiritualista: el hombre y su espíritu no necesitan apologías. No es la ley de la conservación del momento y la energía ni ninguna otra ley física, ni siquiera una probabilidad o una propensión, lo que le ha hecho construir las pirámides o escalar el Everest; y ha alcanzado alturas aún mayores que ésta en la ciencia, el arte y de muchas otras formas.

He tratado de presentar este epílogo metafísico como lo que es: una imagen, un sueño y no una teoría contrastable. La ciencia necesita estas imágenes. Ellas determinan en gran medida la situación de sus problemas. Una nueva imagen, una nueva forma de mirar las cosas, una nueva intepretación, puede cambiar la situación de la ciencia por completo (como ocurrió con la manera en que Einstein consideró las transformaciones de Lorenz). Pero estas imágenes no son sólo instrumentos muy necesarios en el descubrimiento científico, o guías para llegar a él; también nos ayudan a decidir si una hipótesis científica puede tomarse en serio; si es un descubrimiento en potencia y cómo afectaría su aceptación a la situación de los problemas en la ciencia y quizá incluso cómo afectaría a la imagen misma.

Quizá sea aquí donde podamos encontrar un criterio de demarcación *dentro de la metafísica,* entre sistemas metafísicos sin valor racional y sistemas metafísicos que merece la pena discutir y sobre los que merece la pena pensar. La aspiración propia de un metafísico, me inclino a decir, es reunir todos los aspectos verdaderos del mundo (y no solamente los científicos) en una imagen unificadora que le ilumine a él y a los demás y que pueda un día convertirse en parte de una imagen aún más amplia, una imagen mejor, más verdadera. El criterio, pues, será fundamentalmente el mismo que en las ciencias. Que una imagen merezca que se la tome en cuenta depende, sugiero, de su capacidad de suscitar críticas racionales y de inspirar intentos de superarla con algo mejor (y no depende de su capacidad de crear una moda, que deba ser luego suplantada por otra moda, ni de sus pretensiones de originalidad o finalidad). Y este criterio, creo, puede señalar una de las diferencias características entre una obra de ciencia o de metafísica y una obra de arte, que aspira a ser algo que no puede, en su propio modo de ser, ser superado.

---

[46] [Compárense las discusiones de Popper sobre biología en «Sobre nubes y relojes» y «La evolución y el árbol del conocimiento», en *Conocimiento objetivo* (*Obj. Kn.*, 1972), pp. 193-259. *Ed.*]

Sir KARL (RAIMUND) POPPER nació en Viena en 1902. Estudió matemáticas, física, psicología, educación, historia de la música y filosofía en la Universidad de Viena entre 1918 y 1928. Al mismo tiempo trabajó como aprendiz de ebanista y como maestro. En 1978, cincuenta años después de que obtuviera su doctorado, la Universidad de Viena «renovó» su título en una solemne ceremonia y le concedió un doctorado honorario en ciencias naturales.

En 1934, siendo todavía maestro de escuela, publicó *Logik der Forschung,* un libro que se convirtió en un clásico después de su traducción al inglés (*The Logic of Scientific Discovery* se publicó en 1959). Ahora está traducido a muchos idiomas y, después de cuarenta y siete años, sigue reimprimiéndose con frecuencia.

Popper, que vive en Inglaterra, ha dado conferencias en Europa, Nueva Zelanda, Australia, India, Japón y, desde 1950 en que dio las William James Lectures in Philosophy en la Universidad de Harvard, las ha dado a menudo en América. Entre sus libros están *La sociedad abierta y sus enemigos* (por el que recibió el Lippincott Award of the American Political Science Association), *El desarrollo del conocimiento científico, La miseria del historicismo, Conocimiento objetivo* y *Búsqueda sin término.* Junto con Sir Johm Eccles publicó *El yo y su cerebro.*

Posee títulos honorarios de las Universidades de Chicago, Denver, Warwick, Canterbury (Nueva Zelanda), Salford, The City University (Londres), Viena, Mannheim, Guelph (Canadá), Francfort, Salzburgo, Cambridge y Oxford.

Es Fellow of the Royal Society (Londres) y de la British Academy; es Foreign Honorary Member, American Academy of Arts and Sciences; Membre de l'Institut de France; Socio Straniero dell'Accademia Nazionale dei Licei; Membre de l'Académie Internationale de Philosophie des Sciences; Associate, Académie Royale de Belgique; Membre de l'Académie Européenne des Sciences, des Arts et des Lettres; Honorary Member, the Royal Society of New Zealand; Membre d'Honneur, Académie Internationale d'Histoire des Sciences; Ehrenmitglied, Deutsche Akademie für Sprache und Dichtung.

Es también miembro honorario del Harvard Chapter of Phi Beta Kappa; Ehrenmitglied, Allgemeine Gessellschaft für Philosophie in Deutschland; Honorary Fellow, London School of Economics and Political Science y Honorary Fellow, Darwin College, Cambridge.

Ha recibido el Prize of the City of Vienna for Moral and Mental Sciences, el Sonning Prize of the University of Copenhagen, el Dr Karl

Renner Prize of the City of Vienna y el Dr Leopold Lucas Prize of the University of Tübingen.

Ha recibido la Grand Decoration of Honour in Gold (Austria); la Gold Medal for Distinguished Service to Science of the American Museum of Natural History, Nueva York; la Ehrenzeichen für Wissenschaft und Kunst (Austria), y la Ordre Pour le Mérite (República Federal de Alemania).

En 1965 recibió el título británico de Caballero de la Reina.

WILLIAM WARREN BARTLEY III, graduado por Harvard y por la Universidad de Londres, es ex alumno, colega y, desde hace mucho tiempo, asociado de Sir Karl Popper. Ha sido profesor de Lógica en la London School of Economics, profesor de Historia de la Filosofía de la Ciencia en el Warburg Institute y S. A. Cook Bye-Fellow en Gonville and Caius College, Cambridge. Anteriormente fue catedrático de Filosofía y de Historia de la Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Pittsburg, y, desde 1970, es catedrático de Filosofía en la Universidad del Estado de California, en Hayward, donde, en 1979, recibió el título de Profesor Distinguido en el Sistema de Diecinueve Campus de la Universidad del Estado de California.

INDICES

Compilados por Stephen Kresge y Nanc y Artis Sadoyama.

Las referencias en cursiva indican los pasajes de especial importancia. El número de página seguido de «*t*» indica que el término se discute en el lugar referido; «*n*» significa «nota» y «*c*» (en el Indice de Nombres) significa «citado». Se aconseja al lector que consulte los Indices de los demás tomos del *Post Scriptum*.

INDICE DE NOMBRES

Adams, W., 20.
Agassi, J., 19, 154 *n*.
Anderson, C. D., 35.
Andersson, G., 54 *n*.
Aristóteles, 146, 151, 178 y *n*, 180-81, 216-218, 221.
Aspect, A., 22.

Bartley, W. W., III, 20, 49 *n*, 54 *n*.
Bell, J. S., 22, 30, 38, 39 y *n*, 43 *n*, 45*n*, 46-47 *n*, 47, 52, 118 *n*.
Bellarmino, R. F. R., 26, 122, 188.
Berkeley, G., 26, 122 y *n*, 187-188.
Bernoulli, J., 86, 125, 127, 130 *n*, 179.
Beyer, R. T., 130 *n*.
Birkhoff, G., 117 *n*.
Bohm, D., 22, 39 y *n*, 45 y *n*, 46, 58 y *n*, 67, 104 *n*, 119-120, 167 y *n*, 189, 190 *n*.
Bohr, N., 21-22, 30-34, 35-38, 43 y *n*, 44, 52 y *n*, 58 y *n*, 61 y *c* y *n*, 80, 83-84, 90 *n*-91 *n*, 97 *n*, 104 *n*, 117-118, 119-120, 121 y *n*, 123 y *n*, 138 *c* y *n*, 139 *n*, 141 y *c* y *n*, 142 y *n*, 143, 144 *n*, 149-150, 151 y *n*, 153 y *n*, 160 y *c* y *n*, 164-165 y *n*, 166-169, 171-172, 174, 187, 188-189, 193-196, 202, 211-212, 218 *n*, 220 *n*.
Boltzmann, L., 28, 124, 129, 130, 132 *n*, 134-135, 173 y *n*.
Bondi, H., 101, 214.
Bopp, F., 59 y *c* y *n*, 61 y *n*, 69 *n*, 71, 83, 102 *n*.
Born, M., 32 y *n*, 33, 36-37, 68, 69 y *c* y *n*, 70 y *c*, 74 *n*, 101 y *n*, 102 *n*, 112, 119, 121 *n*, 122, 124, 134 y *c* y *n*, 135-136 y *c* y *n*, 140, 143 *n*, 144 *n c*, 147 *n*, 148 y *c* y *n*, 149 y *c*, 150-151, 153 y *n*, 155-157, 158 y *n*, 167 *n*, 174, 180, 189 y *n*, 190 y *n*, 202, 208-209, 211, 214 *n*, 218 *n*.
Boscovich, R. G., 179, 183 y *n*, 185 y *n*, 186.
Bose, S. N., 211, 220.
Bothe, W., 202.
Boyle, R., 179, 218.
Breck, A. D., 117 *n*.
Bruno, G., 178, 188.
Bub, J., 58 *n*, 104 *n*.
Bunge, M., 57 *n*, 59 y *n*, 84 *n*, 90 *n*, 117 *n*.

Calippo, 178.
Cantelli, F., 130 y *n*, 136.
Cassirer, E., 176 *n*.
Cauchy, A. L., 186.
Chadwick, J., 35.
Clauser, J. F., 39 *n*, 45 *n*, 46 *n*, 47.
Cohen, R. S., 54 *n*.
Conklin, E. K., 52 *n*.
Copérnico, N., 122, 178.

Dahrendorf, R., 20.
De Broglie, L., 37, 47 *n*, 58, 68-69, 78, 101, 119, 120, 144 *n*, 159, 167, 174, 180, 187, 189, 191, 208, 220.
Demócrito, 184, 185.
De Moivre, A., 87.

Descartes, R., 26, 172-184, 185-188, 205 *n*, 218.
D'Espagnat, B., 39 *n*.
Dewitt, B. S., 28 *n*, 108 y *c* y *n*-109 y *c* y *n*.
Dirac, P. A. M., 35-37, 69 y *n*, 98 *c* y *n*, 119, 143, 150, 153, 155 y *n*, 171-172, 174, 202-203, 208-210, 214.
Duane, W., 92 *n*.

Eckart, C., 64 y *n*, 102.
Eddington, A. S., 35, 60 *n*.
Einstein, A., 21-22, 25-26 y *n*, 27 y *n*, 28 y *n*, 30-31, 32 y *n*, 33-34 y *n*, 36 y *n*-37, 38 y *n*, 41 y *c* y *n*, 42, 43 y *c* y *n*-44, 45 y *n*, 46 y *n*, 47, 48 y *c* y *n*, 49, 50, 51, 52 y *n*, 56, 57 y *n*, 58, 59 y *c* y *n*, 61 y *n*, 67-71, 74 *n*, 76, 78 *n*, 83, 95, 98, 103, 118 y *n*, 119-120, 121 y *n*, 122 y *c* y *n*, 123 *nc*, 124 y *nc*, 134, 138 *n*, 140-141, 160 *n*, 161, 164 y *n*, 165-167, 171-174, 176, 179, 186-187, 188-192, 202 *c* y *n*, 203, 205-208, 210, 213, 214 y *c* y *n*, 215, 216 y *n*, 218-220 y *c* y *n*, 222.
Euclides, 178, 217.
Eudoxo, 178.
Euler, L., 152 *n*.
Everett, H., 107, 108 y *n*-111 y *n*, 112-113, 201 *n*.

Faraci, G., 47 *n*.
Faraday, M., 67, 123, 174, 177, 179, 185-186, 188, 190-192, 206, 218.
Feenberg, E., 73.
Feigl, H., 64 *n*, 72 *n*.
Fényes, I., 152 *n*.
Fermi, E., 35, 153.
Feyerabend, P., 54 *n*, 90 *n*, 91 *n*, 92 *n*, 169 *n*.
Feynman, R. P., 102.
Freed, J., 19.
Freed, L., 19.
Freedman, S. J., 46 *n*.
Frisch, O. R., 84 *n*.
Fry, E. S., 47 *n*.

Galileo, 67, 122, 174 y *c*, 178, 188-189, 202, 212.
Garuccio, A., 47 *n*.
Geiger, H., 202.
Gell-Mann, M., 33 y *c*, 34 y *c* y *n*.
Gerhardt, C., 184 *n*.
Gibbs, J. W., 129, 154.
Gödel, K., 216 y *n*.
Gold, A., 214.
Gordon, W., 36.
Graham, N., 28 *n*, 108 y *n*.
Green, H. S., 214 *n*.
Gurkowski, S., 47 *n*.

Haas, A., 80.
Hamblin, C. L., 88 *n*.
Hanson, N. R., 35 *n*, 64 y *n*.
Harré, R., 54 *n*.
Heisenberg, W., 26 *n*, 28-31, 32 y *c* y *n*, 33, 34, 35-37, 40, 41 *n*, 42, 43 *n*, 45 *n*, 50-51, 57 *n*, 58 y *n*, 59 *n*, 61 y *c* y *n*, 62 y *c* y *n*, 68 y *c* y *n*-69 y *c* y *n*, 70, 73 y *n*, 74 y *n*, 75, 76, 80-81 y *c* y *n*, 82 y *c* y *n*, 83 y *c*, 86 *n*, 95 y *c* y *n*, 96 y *n*, 97 y *c* y *n*, 98, 102 y *c*, 104 y *c* y *n*, 117-118, 119, 138, 141 y *c* y *n*, 142, 143 y *c*, 144 y *n*, 150 y *c*, 151 y *c* y *n*, 153 y *c* y *n*, 154 y *n*, 155, 156 y *c*, 157, 160-161, 162, 169, 180 *n*-181, 184, 187, 189-190, 197, 198-199, 202, 204, 208, 214 *n*, 215 y *c* y *n*, 216, 218 *n c*.
Heitler, W., 138 y *c* y *n*-139 y *c* y *n*, 140, 141-143, 164 *n*.
Helm, G., 87.
Helmholtz, H., 187.
Heráclito, 177, 181.
Hertz, H., 66.
Hill, E. L., 64 y *n*, 79.
Hobbes, T., 179, 196, 213.
Holt, R. A., 46 *n*.
Hopf, E., 127 *n*.
Horne, M. A., 39 *n*.
Hoyle, F., 214.
Huff, D., 34 *n*.
Hume, D., 213.
Huygens, C., 78, 142, 168.

Jammer, M., 38 *n*, 71 *n c*.
Jánossy, L., 142 *n*.
Jeans, J., 150 y *nc*.
Jeffreys, H., 125.
Jordan, P., 33, 36, 119, 144 *n*, 202, 214.

Kant, I., 27 y *c* y *n*, 175 *n*, 179, 183 y *n*, 185 y *n*, 186 y *n*, 187, 213.
Kapp, R. O., 214, 215 y *n*.
Kasday, L. R., 47 *n*.
Kelvin, W. T., 187.
Kepler, J., 173, 178, 188, 212.
Keynes, J. M., 124-125.
Kirchhoff, G., 144.
Klein, M. J., 36.
Kneale, W., 88 y *n*.
Körner, S., 71 *n*, 97 *n*, 105 *n*, 117 *n*.

Kramers, H. A., 150-151, 202.
Kunh, T. S., 53 y *n*, 54.

Lagrange, J., 152 *n*.
Lakatos, I., 54 *n*, 55 *n*.
Lamehi-Rachti, M., 47 *n*.
Lanczos, C., 57 y *c* y *n*.
Landé, A., 58 y *n*, 61 y *c* y *n*, 67, 70 y *n*, 72 y *n*, 79 y *n*, 91, 92 *n*, 100, 102 y *c* y *n*, 103 y *c*, 118 *n*, 119, 125, 143, 145 y *c* y *n*, 151 y *c* y *n*, 152 y *c* y *n*, 155 y *n*, 206, 208.
Laplace, P., 26, 86 *n*, 87, 129, 193, 196-197.
Leibniz, G. W., 152 y *n*, 175 *c*, 179, 182 y *c* y *n*, 183, 184 y *c* y *n*, 185-187, 214.
Lewis, H. D., 113 *n*, 122 *n*.
Lorenz, H. A., 22, 43 y *n*, 47-48, 51, 52 y *n*, 222.

Mace, C. A., 105 *n*, 113 *n*.
Mach, E., 25, 49, 66 y *n*, 122 *n*, 144, 187.
March, A., 139 *n*.
Margenau, H., 45 *n*.
Maxwell, G., 64 *n*, 72 *n*.
Maxwell, J. C., 28, 123, 131, 133 *n*, 179, 181, 185-187, 190, 206, 218, 220.
Medawar, P., 49 *n*.
Mehlberg, H., 72 y *n*.
Miller, D., 20.
Millikan, R. A., 60 y *c* y *n*.
Mittig, W., 47 *n*.
Moser, S., 139 *n*.
Musgrave, A. E., 20, 54 *n*, 55 *n*.

Natarrigo, S., 47 *n*.
Newton, I., 22, 47, 51-52, 64-65, 67, 122-123, 146, 173, 179, 184, 185 y *n*, 187-190, 202, 212, 216.

Parménides, 177, 178 y *n*, 180-182, 190, 217.
Pauli, W., 22, 35, 36-37, 44, 58 *n*, 97 *n*, 104 *n*, 120 y *c* y *n*, 121, 129 y *c* y *n*, 130 y *c*, 133, 136, 152 y *n*, 156 y *c*, 157 y *c* y *n*, 174, 187, 189, 190 y *c*, 191 y *n*, 219, 220 y *c* y *n*.
Pennisi, A. R., 47 *n*.
Peterson, A. F., 20.
Pipkin, F. M., 46 *n*.
Pitágoras, 177.
Planck, M., 37, 58, 68, 75-78, 126 y *c*, 127 y *c* y *n*, 144, 153 *n*, 170, 174.
Platón, 178, 182, 217-218.
Podolsky, B., 21, 34 *n*, 38 y *n*, 41, 45 *n*, 46 *n*, 49, 61 y *n*, 78 *n*, 83, 118 y *n*, 119, 141, 161, 164 y *n*, 165-167.
Podolsky, P., 38 *n*.
Poisson, S. D., 86-87, 186.
Polanyi, M., 104 *n*.
Prewett, O., 34 *n*.
Prigogine, I., 73 *n*.

Radnitzky, G., 54 *n*.
Riemann, B., 179.
Ritz, W., 80.
Rosen, N., 21, 34 *n*, 38 y *n*, 41, 45 *n*, 46 *n*, 49, 61 y *n*, 78 *n*, 83, 118 y *n*, 119, 141, 161, 164 y *n*, 165-167.
Russell, B., 20, 25.
Rutherford, E., 54, 187.
Rydberg, J. R., 80.

Santilli, R. M., 36 y *c* y *n*, 37.
Schilpp, P. A., 43 *n*, 48 *n*, 59 *n*, 62 *n*, 74 *n*, 78 *n*, 118 *n*, 121 *n*, 124 *n*, 128 *n*, 138 *n*, 171, 216 *n*.
Schlick, M., 163.
Schrödinger, E., 35-37, 40-41, 58, 64 y *n*, 69, 74 *n*, 80, 101, 102 y *n*, 107, 108, 111, 112 y *n*, 113, 119, 122, 140, 141, 143, 144 y *c* y *n*, 145, 146 y *n*, 147 y *c* y *n*, 148 y *c*, 152 *n*, 153 y *n*, 154-159, 172, 173 y *n*, 174, 179, 186-187, 188-192, 201-202, 205 *nc*, 208-209, 210-211, 218-219.
Settle, T., 20.
Shackle, G. L. S., 88 *n*.
Shearmur, J., 20.
Shelley, J., 49 *n*.
Shimony, A., 45 *n*, 47.
Slater, J. C., 150-151, 202.
Szilard, L., 130 *n*.

Thompson, R. C., 47 *n*.
Thomson, J. J., 187.

Ullmann, J. D., 47 *n*.
Urbach, P., 54 *n*.

Van der Merwe, A., 39 *n*, 45 *n*, 117 *n*.
Van der Waerden, B. L., 32 *n*, 86 y *n*.
Venn, J., 86 *n*, 87, 124.
Vigier, J. P., 22, 47 *n*, 58.
Von Laue, M., 58, 98.
Von Mises, R., 70 y *n*, 71, 86 y *n*, 87-88, 91, 124, 136.
Von Neumann, J., 34 y *n*, 35-36, 41 *n*, 51, 58 y *n*, 62 *n*, 81, 87 y *n*, 97, 104, 117

n-118 *n*, 130 y *c* y *n*, 132 *n*, 133, 134-135 y *c*, 136 y *c* y *n*.
Von Weizsäcker, C. F., 32 y *n*.

Wartofsky, M. W., 54 *n*.
Watkins, J. W. N., 19-20.
Weisskopf, V., 32.
Wheeler, J. A., 108.
Whyte, L. L., 185 *n*.
Wiener, N., 144 *n*.
Wigner, E. P., 104 y *c* y *n*, 144 *n*.
Wittgenstein, L., 41 *n*, 66.
Wu, C. S., 47 *n*.

Young, T., 167.
Yourgrau, W., 39 *n*, 45 *n*, 117 *n*.
Yukama, H., 36, 208.

INDICE DE MATERIAS

Abstracción, de las teorías, 117.
Acción a distancia, 22, 39-44, 47-49, 51-52, 181-182, 188;
concepción de Einstein sobre, 43-44, 47-48;
confirmación aparente por los experimentos de Aspect, 22;
entrañada por la interpretación de Copenhague, 39, *43-45*.
véase también Copenhague, interpretación de;
es incompatible con la relatividad especial, 48-49;
no excluida por el realismo, 22, 47-49.
exclusión de, *véase* Localidad, principio de.
Véase también Argumento EPR; Relatividad.
Aceleraciones, 184.
Aleatoriedad, 131-133.
Véase también Probabilidad; Razonamiento estadístico.
Aproximación, por medio de teorías deterministas, a la realidad indeterminista, *véase* Argumento de correspondencia.
Véase también Teoría, determinista.
Argumento, *véase* Discusión crítica.
Argumento de correspondencia, modificando el determinismo clásico, 191-192 y *sección 22*.
Véase también Película, tiras de; Teoría, determinista.
Argumento (o experimento) EPR (Einstein, Podolsky y Rosen, experimento imaginario de), 21-22; *38-44*, 83, 118-119, *sección 17;*
anticipación no válida del autor de, 38 y *n*, 118;
contrastado en la forma de Bell, 46-47;
crítica de Bohr, de, 164-167;
nueva extensión del autor de, 49-52.
reformulaciones de Bell de, 22;
supone principio de localidad, 41-42;
versión de Bohm de, 22, 39, 44-46;
Véase también Acción a distancia; Completud; Preparación de estado; Principio de localidad; Spin; Teorema de Bell.
Aritmetización, de la cosmología, programa metafísico pitagórico de investigación de la, 177-178.
Aspect, su experimento (y relacionados) como crucial entre las interpretaciones de Einstein y de Lorenz de las transformaciones de Lorenz, 22, 44-48, 52 y *n*.
Atmósfera anti-racionalista, *sección 19*.
Atomismo, 178, 179-181, 183-185, 217-218;
programa metafísico de investigación del, 178.
relación del — con la dinámica de Newton, 183.
Atomos, como vórtices de éter (Bernoulli), 179, 187;
constitución de, 59-60, 153-154;
rechazados por Leibniz, 182-183;
y el vacío 178, 180.
Aumento del conocimiento, *Véase* Conocimiento.
Autarquía, 221.
Axiomatización, del cálculo de probabilidades, 85.
Véase también Probabilidad, cálculo de la

Billar romano (tablero de clavijas) 91-95, 110-111; 169-170;
como modelo de la reversibilidad del tiempo, 107, 111;

como modelo del argumento de Everett, 108-111;
como modelo de un mundo de probabilidades objetivas, 105-107;
no hay superposición de amplitudes en, 106-107;
«normal», 106;
propensiones de, 92-93, 169-170.
Biología, 99, 104-105, 176;
y propensiones 220-222.

Cálculo de probabilidades, *véase* Probabilidad, cálculo de.
Cambio, como realización de potencialidades o propensiones, 175, 176.
problema del, 177, 180-181;
realidad del, 177;
teorías sobre, 180-181, 188.
Campo, cuantizado, 208;
determina las propensiones, *Véase* Propensión (es), campos de;
dualismo de materia y, *sección 26;*
electromagnético, 58-59;
realidad del, de Einstein (de Faraday) 206;
teoría (de Einstein) de, unificada, 56; *sección 26.*
Caos molecular, hipótesis de, 125.
Carga electrónica, problema de, 60, 213.
Cartesiano, programa metafísico de investigación, *véase* Programas metafísicos de investigación, cartesiano.
Causación, teoría de la — por empuje, 179, 182;
problema de, 180-181.
Ciencia, 25.
actitud tecnológica hacia, 175;
interpretación kantiana de, 27;
naturaleza de, teorías sobre, 119-123;
«normal», 55;
revolución, estado normal de, 25;
tarea de, 25, 63, 121-122, 188;
Véase también Cosmología; Programas metafísicos de investigación.
Cisma, o crisis, en física, 25-29, 37, 118-120, 188;
debido al subjetivismo, a los argumentos de completud, 25-28.
Véase también Programas metafísicos de investigación, choques entre.
Completud, supuesta, de teoría cuántica, 21, 25, 29, 30-31, 37-38, 42, 61, 83, 141;
confusión de — con corrección, 61;
del formalismo, diferenciada de la — de la teoría interpretada, 141-142;
del normalismo matemático, *sección 9.*
rechazada por Einstein, 30;
refutada por el descubrimiento de nuevas partículas, 36-37;
refutada por el experimento de la caja autorregistradora, 138-139;
supuesta prueba de - de von Neumann, 34 y *n.*
Véase también Copenhague, interpretación de; «Tesis-del-final-del-camino»; Teoría cuántica.
Comprensión, de las teorías, *Véase* ahí.
Comprensibilidad, problema de, 184-185.
Conceptos, marcos conceptuales, 63-67.
Véase también Teoría.
Conciencia, 57, 62-63, 94-95, 104-105, 174.
Conocimiento, aumento del, 54-56;
véase también Discusión crítica.
falta de («nesciencia») ligada a la física probabilística, 28, 70, 94, 124-126, 127-129, 151, 162;
límites inherentes a, 21, 28-29, 31;
papel del — en la medición teórico-cuántica, 57;
véase Teoría cuántica, observador en; Experimento crucial extendiendo el argumento EPR original.
supuesta conexión con la falta de entropía, 128-136.
Conservación, leyes de, 218, 221-222;
en argumento de la película, 197-198;
no entrañan determinismo, 202-205;
violadas por la teoría de Everett, 110-111.
Véase también Teoría cuántica, interpretación de los muchos mundos de Everett de.
y teoría de Bohr, Kramers y Slater, 202.
Contrastabilidad, de la versión de Bohm del argumento EPR, 22, 39, 44-46.
Véase también Argumento EPR.
Contrastación, contraste, de la interpretación de Heisenberg de sus propias fórmulas, *véase* Experimento crucial extendiendo el argumento EPR original;
de las fórmulas de Heisenberg, 74-80.
Véase también, Fórmulas de Heisenberg;
de las relaciones de dispersión 80-84;
véase también Dispersión, relaciones de
Copenhague, interpretación de —, de la teoría cuántica, 25, 29, 30, 33-34, 38-41, 43, 46-47, 50-51, 57 *t*-63, 117-120, 138-139, 157-158, 189-190, 218 *n*, 219;
como concepción de Bohr y Heisenberg, 29-30.
contrastación de, 49-52.

crítica de Schrödinger de, 143-144 y *n*, 145-146;
choca con el principio de localidad, 43;
el observador en, 29, 57-63, 67, 104-107, 138, 202-203;
entraña acción a distancia, 21, 39, *43-45;*
obsolescencia de, 59, 60-63;
periodización de, 21-22;
tendencias anti-racionales de, 118.
Véase también Argumento EPR; Dualismo de onda y partícula;
Experimento crucial extendiendo el argumento EPR original;
Probabilidad, interpretación subjetiva de la; Real;
Reducción del paquete de ondas; Subjetivismo; Teoría cuántica.
Cosmología, 25, 52-53, 177-181, 188.
véase también Programas metafísicos de investigación.
Cosmología física, problema fundamental de, 180-181.
Creación de la materia, *véase* Materia.
Creatividad humana, 22.
Crítica, posibilidad de-, de las teorías metafísicas, 211-212;
del programa propensivista de investigación, 213, *sección 27.*

Choque, entre programas metafísicos de investigación, *véase* Programas metafísicos de investigación;
entre las teorías y la realidad, 27.
Véase también Realismo.

Definición, poca importancia de, 66-67;
véase también Conceptos, marcos conceptuales.
Demarcación, criterio de, dentro de la metafísica, *222;*
Véase también Metafísica; Programas metafísicos de investigación.
Derrumbamiento del vector de estado, del paquete de ondas, *Véase* Reducción del paquete de ondas; Copenhague, interpretación de.
Descartes, programa metafísico de investigación de, 177-178;
principio de causalidad, 179;
teoría del libre albedrío o libre voluntad, 205 *n.*
Determinismo clásico,
cuestión de, 189;
laplaciano, 86 *n*;
lleva a la interpretación subjetiva de la probabilidad y al subjetivismo en la física probabilista, 118-119, 123-126, 129-130, 153;
modificado por un argumento de correspondencia, *sección 22.*
Véase también Correspondencia, argumento de;
no entrañado por las leyes de conservación, 202-205;
reinterpretación indeterminista de, 175-176, 195;
y mecánica estadística, 135-136.
Véase también Probabilidad, interpretación subjetiva; Subjetivismo.
Dinamismo, programa metafísico de investigación de, 179, 181, 184-85, 218.
Dirección del tiempo, *véase* Tiempo.
Discontinuidad, 154, 197.
Discusión crítica, papel de — en el aumento del conocimiento, 54-56, 62-63, 222;
de las especulaciones metafísicas, 53-54, 187-189, 211-213.
véase también Programas metafísicos de investigación;
deterioro de, 172-174.
Discusión filosófica, importancia de, 120.
Dispersión, *74, sección 16;*
causa de la, 49;
contrastación de, 74-75, 161-162;
de la energía, 76-77;
de las partículas, no puede suprimirse, 74;
del momento, 77-78.
Véase también Experimento crucial extendiendo el argumento EPR original; Propensión, de dispersión.
Dispersión, relaciones de, 21, 74-75;
contrastación de, *80-84;*
Véase también Experimento crucial extendiendo el argumento EPR original; Fórmulas de Heisenberg; Propensión, de la dispersión; Razonamiento estadístico.
Disposiciones, propiedades disposicionales, 154 y *n*, 175, 210-211.
Dualismo, dualidad,
de materia y forma, 178;
de partícula y onda, y de materia y campo, 30-32, 33, 73, 74 y *n*, 75, 84, 98-105, 187, 218 *n, secciones 11 y 26;*
de potencialidades, 219;
rechazada por el autor, 145.
Véase también, Campo; Campo de propensiones; Copenhague, interpreta-

ción de; Embrollo cuántico; Materia; Onda; Partícula; Principio de complementariedad; Propensión, programa metafísico de investigación de la.
Duane, tercera regla cuántica de, 92 *n*.

Ecuación de ondas (Schrödinger), 41, 108, 140;
describe una realidad física, 112-113;
fusión de estados como consecuencia de — y de la interpretación de Everett de la teoría cuántica, 111-112;
interpretación de Born, 83;
simetría, reversibilidad en el tiempo de, 106-108, 111-113.
Ecuaciones diferenciales, principio de, 179.
Einstein, teoría de la relatividad de, *véase* Relatividad.
Einstein-Bohr, correspondencia entre, 32.
Einstein-Bohr, debate entre, 30-31, 37, 42-45, 61.
Elasticidad, problema de, 183-184, 186.
Electrón, 35, 59-60, 156, 206.
en los saltos cuánticos, 153;
puede tener posición y momento precisos, 83;
teoría del — de de Broglie y Schrödinger, 208;
teoría del — de Dirac, 209-211;
Elementos, sistema periódico de los, 60.
Embrollo cuántico, 29, 70-73, 84, 96.
Véase también Copenhague, interpretación de; Dualismo; Razonamiento estadístico.
Empuje, 179, 183-185;
cartesiano, 181-182.
Véase también Localidad, principio de.
Energía atómica, usos pacíficos de, 211 y *n*.
Entropía, 128-136;
caracterizaciones objetivas de, 130-131;
véase también Propensión, programa metafísico de investigación de la;
supuesta dependencia de - del conocimiento, 128-136, *sección 5;*
y probabilidad, 132-133.
Véase también Mecánica estadística.
Enunciados de probabilidades singulares, 124.
Esencialismo, programa metafísico de investigación del, 147-149, 178.
Espacio, absoluto, *Véase* Espacio y tiempo absolutos;
de configuración, 73;
de Hilbert, 81, 103;
muestral, 72-73, 101.
Espacio de Hilbert, vectores en, 81.
Espacio y tiempo absolutos, 42-43, 47-48, 51-52.
Especialista, 187.
Especulación, 187.
Espejo, semi-permeable, experimento con, 95-96, 171.
Espíritu humano, 222.
Estabilidad atómica, problema de, 67-70;
sustituido por problema estadístico, 70.
Véase también Materia; Propensión, programa metafísico de investigación de la.
Estadísticos, problemas, cuestiones, exigen respuestas estadísticas.
Estados cuánticos exentos de dispersión, 29.
Evaluación, racional de las teorías metafísicas, 53-54, 187-188, *secciones 27 y 28.*
Véase también Discusión crítica; Teoría.
Everett, interpretación de muchos-mundos de, 107-113,
entraña fusión de infinidad de mundos reales, 111;
ilustrada por el modelo del billar romano, 110;
viola las leyes de conservación, 111;
y argumento de las tiras de película, 201 *n*.
Existencia, *véase* Realidad.
Expansión del universo, 214.
Experimento, de las cajas autorregistradoras, 138-139;
con espejo semi-permeable, 95-96; 171;
crucial, extendiendo el argumento EPR original, *véase* ahí;
de Aspect (y relacionados) 22, 44-47, 52 y *n*;
de dos ranuras, 79-80, 107, *sección 18;*
de una ranura, 77, 161-164; *véase* Argumento EPR;
del billar romano, *véase* ahí;
dependencia de — de la teoría, 62-63, 99-100;
dispersión, véase Argumento EPR;
imaginario, de Einstein, Podolsky y Rosen, *Véase* Argumento EPR;
imaginario, del autor, no válido, 38 y *n*; 118;
relación con las especificaciones, 99;
repetición con las especificaciones, 99;
repetición de, 91, 95, 161;

Experimento crucial, extendiendo el argumento EPR original, 49-52;
véase también Argumento EPR.
Experimento de las dos ranuras,
como experimento de la periodicidad espacial, 78-81, 107, *sección 18;*
resuelto por la interpretación propensivista, 167;
y argumento del soldado de juguete, 204-205.
Experimento de una ranura, 77-78, 161-164.
Experimento imaginario de Einstein, Podolsky y Rosen, *véase* Argumento EPR.
Experto, 187.
Explicaciones, evaluación de, 177.
Extensión, 175, 181-183.

Falta de conocimiento, 28, 30-31.
Einstein, cambio de opinión de, con respecto a, 28.
relación con estadística, 28, 70.
Véase también Conocimiento, falta de.
Faraday, programa metafísico de investigación de, 177, 188, 190.
Física, 25-29;
cismas en, 25-30; 119-120, 188;
clásica, como aproximación a la física cuántica, 195-202;
de Descartes, 181-182;
del Renacimiento, 178-179, 218;
historia de, 176, *sección 20*;
probabilística, 28.
Véase también Ciencia; Cosmología.
Físicos, diferentes actitudes ante la interpretación de Copenhague, 118-120, 172-174.
Fluidos, teoría de los, 218.
Formalismo matemático de la teoría cuántica, 140, *sección 22.*
Fórmulas de Heisenberg, 21, 28-29, *39-40,* 70, 73 y *n* - 81, *sección 16,* 169, 189, 204;
como explicación del carácter estadístico de la mecánica cuántica, 28, 70, 71;
contrastaciones de, 215;
establecen límites a la dispersión, 74, 215;
interpretación del autor como relaciones de dispersión, 21;
interpretadas como límites al conocimiento, 29;
relación con la dualidad de onda y partícula, 33, 73 y *n* — 74 y *n*;
se refieren a una población de partículas, 74-75;
Véase también Conocimiento; Medición, de posición y momento; Relaciones de dispersión; Teoría cuántica, observador en.
Fotón, 35, 179-180;
idea de asociación con ondas, 69;
interacción de campo de fotones con campo de electrones y positrones, 207;
Función de distribución, 71-73;
no es propiedad de un elemento, 73, 101.
Fuerza, fuerzas,
campos de, 146, 179;
cuatro fundamentales, 60;
de Leibniz, 179, 182-184;
de repulsión, 182-185, 186;
en Boscovich, 179, 183-184, 185 y *n*;
en Faraday, 179, 186-187;
en Kant, 179, 183-184, 185-187;
en Maxwell, 179, 186, 218;
Fuerzas de repulsión, *véase* Fuerza.

Geometrización, de la cosmología, programa metafísico de investigación de, de Platón, 178, 217;
en la teoría unificada de campos, 179-180.
Grandes números, ley de -, de Bernoulli y Cantelli, 86-87, 125, 129-130, *sección 5.*
Gravedad, 146.

Historia, de la física y de la situación de los problemas, *sección 20;* del universo, *véase* Cosmología.

Idealismo, 25-26, 196, 213;
argumentos en favor de, 48-49;
conflicto con la biología y la teoría de la evolución, 49;
experimento de Aspect, teorema de Bell e, 47-48,
Imagen, *véase* Teorías, no «imágenes»; *véase también* «Imagen ondulatoria».
«Imagen ondulatoria», 64, 66, 84, 103, 157-158.
Incertidumbre, supuesta creación de—, por la falta de conocimiento, 28, 49-50.
Independencia, en la teoría de la probabilidad, refuta la interpretación subjetiva, 125.
Indeterminismo, de la física clásica y de la cuántica, 102-104;
compatibilidad con el realismo, 190;

consecuencias estructurales de, 216;
cuestión de, 189-190, 191-192, 195-196;
del programa propensivista de investigación, *véase* Propensión, programa metafísico de investigación de;
modelo aproximado del, teórico-cuántico, *sección 25.*
y argumento de la película, *secciones 22-24;*
y reducción del paquete de ondas, *sección 23.*
Información, papel de, en la mecánica estadística, 128-136; 151;
en la medición teórico-cuántica, 105-107;
Véase también Medición, de posición y momento; Teoría cuántica, observador en;
Instrumentalismo, 120-123, 149, 188-189, 190-192, 213;
su uso para escapar a la crítica, 122;
su uso por la Iglesia, 122.
Intensidad, de fuerzas, 183.
Interacción, de las propensiones, *véase* Campos de propensiones; Propensión, programa metafísico de investigación de;
niveles de, 60.
Interferencia, 42-43, 61-63, 102-103, 118-119, 165, 168-172, 195, 198-200, 203-204.
Interpretación frecuencial de la probabilidad, 124, 161;
Véase tambien Probabilidad.
Intuición, facilidad intuitiva, 123, 196.
Irracionales (números),
descubrimiento de, 178;
teoría geométrica de, 178.
Irrefutabilidad, sentidos de, 54 *n.*

Leibniz, teoría dinámica de la materia de, 179, 181-187.
Ley,
de conservación, *véase* Conservación, leyes de;
de los grandes números, no es puente entre creencias subjetivas y frecuencias objetivas, 86-87, 125-126.
Véase también Probabilidad.
Libertad, humana, 176.
Libre voluntad (o libre albedrío), Descartes sobre, 205 *n,*
Líneas-mundo, problema de Gödel de — cerradas, 216 y *n.*
Localidad, principio de (principio de acción a distancias decrecientes, «Prinzip der Naherwirkung»), 41-44, 47-49,
en la teoría de los campos de fuerzas, 179, 184-185;
en la teoría del mundo como reloj, 179;
problema de, 39;
sostenido por Einstein, 44;
y la teoría de la relatividad especial, 45 *n.*
Véase también Argumento EPR; Copenhague, interpretación de; Relatividad.
Lógica, de la situación, 53 *t*, 54-55.
Lorenz, transformaciones de, 22, 222.

Marco conceptual, *véase* conceptos.
Materia (cuerpo), como espacio con forma, 178.
como realización de propensiones, 175-176, 214; *sección 26.*
creación de, 214;
destructible, 179;
dualismo de, y campo, *sección 26;*
explicación de, 179-180;
problema de, 52, 144-146, 180-187;
propiedades esenciales de, según Aristóteles, 181;
según Hobbes, Descartes y Boyle, 179, 181;
según Kant, 185-186 y *n.*
según Leibniz, 179, 181, 182-183;
según Mach, 187;
según Newton, 145-146;
según Poisson y Cauchy, 186;
teoría electromagnética de, 21, 58-60, 205-207.
teoría general de, 214.
Maxwell, demonio de, 133 *n.*

Mecánica, clásica, estadística y de partículas, 68;
equivalencia de mecánica de ondas y de matrices, *64-65;*
mecánica cuántica, *véase* Teoría cuántica; Estadística, *véase* ahí.
Mecánica de ondas,
cuestión de equivalencia con la mecánica de matrices, 64-65;
en la explicación del problema de la estabilidad atómica, 68.
Mecánica estadística, 28, *68-70;*
clásica, *sección 4;*
interpretaciones erróneas, subjetivas, de, *sección 5;*
objetividad de, 62-63, *sección 4;*

superflua desde un punto de vista determinista, 135-136.
Véase también Entropía.
Medición,
carácter retrodictivo de — en contrastaciones de las relaciones de dispersión, *80-84;*
de posición y momento, 40-42, 78-80, *81-84,* 92-95, 159-160, 162-164, 170-171;
de un efecto Doppler, 78;
en mecánica cuántica, en comparación con física clásica, 57-63;
indirección de, 62;
posibilidad de, 29;
retrodictiva, del momento, 162-164;
verificación de, 81;
Véase también Experimento crucial extendiendo el argumento EPR original; Fórmulas de Heisenberg; Relaciones de dispersión; Teoría cuántica, observador en.
Mente, humana, realidad de, 22.
Mesón, 36, 208.
Metafísica,
demarcación, criterio de — dentro de la, 222;
diferencia de la ciencia, 222, *secciones 27-28;*
discusión crítica de, 54, 187-188; 211-213;
tarea de, 222.
véase también, Discusión crítica.
Método científico, como algoritmo, no existe, 55-56.
Modelos, construcción de, 123.
Momento, medición de, 40-42, 78-80, *81-84,* 93-95, 159-160, 163-164, *170-171,* 215.
Mónadas, Leibniz sobre, 182-185.
Movimiento, realidad de, 178.
Muchos-mundos, interpretación de — de la teoría cuántica, *véase* Everett, interpretación de los muchos-mundos de.
Mundo físico, consistente en cambiantes propensiones al cambio, 175-176.

Neutrino, *35-36,* 60, 213.
Neutrón, 34-*35,* 36, 60, 207.
Newton, problema de, 216-217.
Números, ley de los grandes, 86-87, 125-126, 129, *sección 5.*

Objetividad,
de la mecánica estadística, *sección 4;*
de las propensiones, 105-107;
de procesos irreversibles, 126-127;
en teoría cuántiva, 57, 138-140, *sección 7;*
en teoría de la probabilidad, 28-29, 85-87, 118-119, 125-126, 130, *sección 6.*
Objetivismo, cuestión de, 189-190.
Observable, *104.*
Observaciones, papel en la supervivencia, 27.
seguridad de, 27.
Observador (sujeto), papel de, en la medición teórico-cuántica, 28-29, 42-43, *57-63,* 67, 70-71, 94-95, 104-107, 138, 139-143, 161-162, 191-192, 202-203.
Onda, ondas,
dualismo de partícula y, *véase* Dualismo;
teórico-cuántica, como representación matemática de propensiones, 144-146, *sección 11.*
Véase también Propensión, programa metafísico de investigación de la.
Ondas piloto (de Broglie), Bohm sobre, 189;
como ondas de propensiones, 159, 167.
Ondícula, *véase* Dualismo de partícula y onda.

Paquete de ondas, 95-98;
determina propensiones, 157-158.
Véase también Ondas; Reducción del paquete de ondas.
Paradojas, de la teoría cuántica, resueltas por las interpretaciones propensivistas, 161; Capítulo III.
Partícula, 30, 33-34, *98-107,* 159, 192; *secciones 11, 14, 15 y 26;*
asociación de —, con campos de propensiones, 103-104;
como propensiones para la interacción, 210;
como realizaciones de propensiones, 175-176, 208-209;
creación de pares, 83, 210;
creación y destrucción de, 208;
imagen corpuscular, 63-64, 66, 84, 157-158;
interpretación de Schrödinger, como paquetes de ondas, 41;
necesitan explicación, 156-157, 205;
no primarias, 156;
número de, en aumento, 21, 34-36, 207-208, 213-214;
realidad de, 209-211, *secciones 14 y 26;*

teorías de campos como teorías estadísticas de agrupaciones de partículas, 208-209;
tienen a la vez posición y momento, 162-172, *secciones 17 y 18;* *Véase también* Argumento EPR; Dualismo.
Paseo al azar, argumento del soldado de juguete, *secciones 10 y 25.*
«Pateabilidad» o capacidad de recibir patadas, y realidad, 67, 91-92, 100, 103, 206.
Película, argumento de las secuencias de tiras de—, *secciones 22, 23, 24;*
«clásicas», ilustran el mundo cambiante, *sección 22; véase también* Argumento de correspondencia;
de propensiones, *sección 24, véase también* Propensión, programa metafísico de investigación de;
modelo para aspectos de la reducción del paquete de ondas, *sección 23; véase también* Reducción del paquete de ondas.
Perturbación, teoría de—, como teoría del cambio, 181.
Pitagórico, programa metafísico de investigación de, 178.
Platón, programa metafísico de investigación de geometrización de, 178.
Posibilidad, ponderada, *véase* Propensión.
Posible, transición de lo — a lo real, *véase* Real.
Posición, espacio de, *sección 15.*
Posición, medición de, 40-42, 78-79, *80-84,* 92-95, 159-160, 162-164, 170-171.
Positivismo, 25-27, 28-29, 49, 152, 187-188, 212-213;
influencia sobre Einstein, 26.
rechazo posterior por Einstein, 25-27.
Positrón, 34-*35,* 57.
Potencia resolutoria armónica, principio de, relación con las relaciones de indeterminación, 76.
Potencialismo, programa metafísico de investigación del, 178, 180-181.
Precisión de conceptos, 65,
de mediciones, 74;
de predicción, 74;
de retrodicción, 163.
Preparación de estado, mecánico-cuántica, 45 y *n*-46,
dos tipos de, 45 y *n.*
impone nuevas propensiones, 45 y *n*;
simplemente selectiva, 45 y *n.*
Principio de Bose, 211.
Principio de complementariedad, de Bohr, 33, 71, 123, 129, 171, 189, 192;
asociado a la dualidad de onda y partícula, 33, 84.
desbaratamiento de la asociación, 33.
Véase también Dualismo, de partícula y onda; Medición, de posición y momento; Teorías, no «imágenes».
Principio de correspondencia, de Bohr, 68.
Principio de exclusión, 37, 151-153, 213.
Principio de localidad, *véase* Localidad.
Probabilidad,
axiomatizaciones de, 85;
bayesiana, 87;
brecha entre interpretación subjetiva y objetiva de, 85-87, 125-126;
cálculo de, 84-85;
en apuestas, aplicación de la interpretación propensivista, 88-89;
enunciados de, diferenciados de enunciados estadísticos, 89-90;
enunciados de probabilidades singulares, 124-125, 161;
falta de conocimiento y, 30;
información y, 105;
interpretación clásica de, 87-88;
interpretación frecuencial de, 87-88, 118-119, 123, 161;
interpretación propensivista de, 87-91, 118; *véase también* Propensión;
interpretación subjetivista abandonada por Einstein, 28 y *n*, 29-30;
interpretación subjetiva o subjetivista de, 25-26, 29-30, 71, 85-87, 118-119, 124-127, 129-130, 189-190, *sección 5*; *véase también* Subjetivismo;
interpretación subjetiva y Laplace, 25-26;
interpretaciones objetivas de, 29-30, 86-94, 122-123; *sección 4; véase también* Propensión;
oscilación entre interpretaciones subjetivas y objetivas de, 28-29, *sección 6,* 129, 130, 149, 189-190;
relación de esta mezcla con el determinismo, 119;
teoría de, aplicación a casos únicos (singulares), 98.
Probabilidad bayesiana, 87;
Véase también Probabilidad, interpretación subjetiva de.
Problema,
carácter estadístico de los problemas teórico-cuánticos, 67-70;

de estabilidad atómica, *véase* ahí;
de la cosmología, 177-181, *véase también* Cosmología;
de la localidad, *véase* Localidad, principio de;
de la materia, *véase* Materia;
elección de, *sección 20.*
Véase también Problemas estadísticos; Razonamiento estadístico; Teoría cuántica.

Problemas estadísticos, cuestiones estadísticas, exigen soluciones estadísticas, 70.

Procesos irreversibles,
ligados a la falta de conocimiento, 128, 134, 136-137;
ligados por Planck a la improbabilidad, 126-127;
objetividad de, 126-127;
Véase también Entropía; Mecánica estadística; Reversibilidad del tiempo; Teoría cuántica, el observador en.

Profecía historicista, 190 y *n*, 191.
Programa de investigación, *véase* Programa metafísico de investigación; Propensión, programa metafísico de investigación de la.

Programa metafísico de investigación, 53, 54 *t*-56, *secciones 20 y 21;*
cartesiano, 179, 181-183;
como física especulativa, 176-178, 180-181;
crea problemas y determina soluciones, *sección 20,*
choques entre, 188;
del autor, de la interpretación propensivista y de las propensiones, físicas, *véase* Propensión, programa metafísico de investigación de;
ejemplos de, 178-180;
especulaciones cosmológicas como, 53;
indispensables para la ciencia, 181;
relación con las teorías científicas, 53-54;
relación con los paradigmas de Kuhn, 53-58;
susceptibilidad de ser criticados, 54-55, 187-188;
y «ciencia normal», 54-55;
y «programas científicos de investigación», 54 y *n*-56;

Propensión, propensiones,
anticipaciones parciales de, por Aristóteles, Born, Heisenberg, Landé, Schrödinger, *secciones 11 y 12;*
campos de propensiones, 146, 206-211, 214, 215-216, *sección 26;*
como frecuencia virtual, 91;
como pesos (ponderaciones) de posibilidades, 90, 146-147, *sección 24;*
como propiedad de disposiciones experimentales repetibles, 99;
como propiedades disposicionales, 145-146;
como propiedad no de la partícula sino de la situación física objetiva, 90 y *n*, 99-100, 162, 170 *n*;
como propiedad relacional, 145-146, 220-221;
de la dispersión, sección 16; *véase también* Fórmulas de Heisenberg;
descritas por ecuaciones de campos, 209;
determinación por, 216;
dualistas y monistas, 175-176, 208-211;
en biología, 220-222;
en disposiciones experimentales de dos ranuras, 168-169;
en la disposición experimental del billar romano, 91-94, 169-170;
físicas, 145-148, *217,* 218;
hipótesis de contrastación de, 92-94;
idea de — en deuda con Einstein, 219;
«imagen ondulatoria» convertida en propiedad real por, 103;
inherentes, 220-222;
interpretación de la indeterminación, *véase* Relaciones de dispersión;
interpretación de los saltos cuánticos, 154-156;
interpretación del cálculo de probabilidades, *87-91; véase* Probabilidad;
objetividad de, 106-107;
ondas, interferencia de, 103;
paquete de ondas y, 157;
partículas y ondas y, *sección 11;*
realidad de, 91, 100, 102-103, 145-148, 206-211;
relatividad de, 99;
superposición y realidad de, *103;*
véase también Teoría cuántica como teoría de las — físicas, 118-119;
tiras de películas, *sección 24;*
todo como, 217;
y casos únicos (singulares), 99;
y concepción de Schrödinger, *sección 11;*
Véase también Dispersión; Dualismo; Razonamiento estadístico; Relaciones de dispersión.

Propensión, propensiones, programa metafísico de investigación de las — del propio autor, *secciones 22-28;*
concepción realista de la dirección del tiempo en, 215;
incontrastabilidad de, 210-212;
indeterminismo de, 195; *secciones 23 y 25;*
objetivismo de, *sección 23;*
problemas abiertos de, *sección 27;*
realismo de, 195-196; *sección 23;*
resuelve el dualismo de materia y campo, *sección 26;*
resuelve problemas en programas de investigación anteriores, *216-219;*
susceptibilidad de, de ser criticado, 213; *sección 27;*
sustituye la interacción determinista por propensiones, 203;
Propiedades relacionales, realidad de, 145-147.
Protón, 34-35, 59-60.
Prueba y error, método de, 189.
Puente, supuesto, de supuestos no estadísticos a conclusiones estadísticas, 86-88, 208-209.
Véase también Grandes números, ley de los.

Racionalidad, 212-213.
Razón humana, 176.
Razonamiento estadístico, teorías estadísticas,
añaden a nuestro conocimiento, 75;
carácter de, *70-73,* 74, 208-209;
contrastación de, 75.
Véase también Probabilidad; Propensión; Teoría, estadística.
Real, transición de lo posible a lo, 97, 141-142, 151, *secciones 9, 10, 13;* 198-200.
Véase también Reducción del paquete de ondas.
Realidad, 42;
atribución de — en mediciones, 82-84;
de campos de propensiones, 100-101;
de partículas, *sección 14. Véase también* Partícula;
del campo de Einstein (Faraday), 206;
grados de, 67;
indeterminista, *véase* ahí.
Realidad indeterminista, representada aproximadamente por las teorías deterministas, *secciones 22 y 23. Véase también* Argumento de correspondencia; Propensión, programa metafísico de investigación de la; Teoría; Universo, indeterminista.
Realismo, 22, 26-27, *67;*
científico, 27;
crítico, 27;
cuestión de, 189;
del programa metafísico de investigación de las propensiones, del propio autor, *véase* Propensión, programa metafísico de investigación de;
no excluido por la acción a distancia, 22, 47-49;
puesto en duda por el escepticismo, 26;
rechazo subjetivista de, 28-29.
Reducción del paquete de ondas, 93-95, *105-*110, 154-155; *secciones 8, 10 y 13;* 142-143, 189, 197, 205-206, *sección 23;*
como consecuencia trivial de la teoría de la probabilidad, 97-98, 142-144, *secciones 10 y 13;*
comparada con el experimento del billar romano, 93-96;
experimento sobre —, con espejo semipermeable, 95-96, 171-172;
no es efecto o salto cuántico, 154-155;
reinterpretación de —, en términos del argumento de las tiras de película, *sección 23;*
surge dentro de la función de ondas de Schrödinger, según el argumento de Everett, 108.
Relaciones de incertidumbre, véase Fórmulas de Heisenberg.
Relaciones de conmutación, 37, 74 *n.*
Relaciones de indeterminación, explicadas por la interferencia del observador, 42-43, *sección 16.*
Véase también Fórmulas de Heisenberg.
Relatividad, teoría especial de la—, de Einstein, 31, 47-48, 51-52;
actitud de Bohr hacia, 52;
entraña el principio de localidad, 47;
es incompatible con la acción a distancia, 47, 48-49;
interpretación de, de Lorenz, 47, 51-52;
interpretación de su formalismo, Einstein *versus* Lorenz, 47, 51-53;
refutabilidad de —, y envío de señales, 47 *n.*
su propia interpretación de, 31.
Véase también Argumento EPR; Experimento crucial, extendiendo el argumento EPR original.

Relatividad, teoría general de la —, de Einstein, 31;
apelación de Bohr a, 43 *n*.
su concepción de, 31.
Reloj, teoría del mundo como, 179-182; refutada, 179-180.
Renormalización, método de, 207-208.
Retrodicción, función en la medición teórico-cuántica, 80-81, 83.
Reversibilidad, *véase* Ecuación de ondas (Schrödinger); Procesos irreversibles; Reversibilidad del tiempo.

Salto cuántico, 151, 197; *sección 13;*
supuesta identidad con la reducción del paquete de ondas, 154;
véase también Propensión, interpretación de los saltos cuánticos; Reducción del paquete de ondas.
Schrödinger, ecuación de, *Véase* Ecuación de ondas (Schödinger).
Sentido (significado) doctrina de, aplicada al debate sobre la teoría cuántica, 41 *n*, 44, 61, 80-81, 122, 164-165, 166-167.
Sentido común, 51, 175.
Simetría, de la ecuación de ondas (Schrödinger), *véase* ahí.
Véase también Tiempo, reversibilidad de.
Sistema físico, como suma de sus propensiones, 175.
Situación de los problemas, 175-178, 181-182, *sección 20,* 212-213;
dentro de un programa de investigación, 188, 212-213.
Spin, 39, 44-46;
argumentos sobre, en relación con la interpretación de Copenhague, 46;
en la versión de Bohm del argumento EPR, 22, 39, 44-45 y *n*, 46;
en las desigualdades de Bell, 22, 39, 47.
Subjetivismo en física, 25-29, 70-71, 84, 189.
Véase también Copenhague, interpretación de.
Sucesiones, propiedades estructurales de, orden y desorden en, 132-133.
Superposición, 92 *n*, 102-103;
peculiar de la mecánica cuántica, 102;
véase también Experimento de las dos ranuras;
principio de, 76-77.
Sujeto, en las mediciones teórico-cuánticas, *véase* Observador;
Teoría cuántica, observador en: *Véase también* Medición.

Teorema de Bell, 22, 39, 45 *n*, 46 y *n*, 47 y *n;*
contrastaciones, de —, cruciales entre las interpretaciones de Einstein y de Lorenz de la relatividad especial, 47-48;
impone nuevas propensiones, 45-46.
Véase también Argumento EPR.

Teoría, teorías,
carácter estadístico de, 70-72;
Véase también Razonamiento estadístico;
comprensión de, 120-124;
concepción de Einstein, comparada con la de Bohr y la de Heisenberg, 31-33;
deterministas, como aproximaciones a la realidad indeterminista, *sección 22;*
véase también Argumento de correspondencia;
equivalencia de, 63-65;
evaluación racional de — metafísicas, 187-188, 212-213;
véase también Discusión crítica;
invenciones humanas, 27, 62-63;
más que instrumentos, 63-64;
véase también Instrumentalismo;
no pueden identificarse con sus marcos conceptuales, 64;
no son «imágenes», 66;
pueden chocar con la realidad, 27;
véase también Realismo;
pueden formularse en diversos marcos conceptuales y son independientes de ellos, 62-67;
verdad, o aproximación a la verdad, de, 62-66, 119-123.

Teoría cuántica, 36 *t*-37 *t*, 58 *t*-59 *t*.
actitud de Bohr hacia, 32-34;
actitud de Heisenberg hacia, 30-33;
ataque al programa de Einstein-Schrödinger, 188;
carácter estadístico de sus problemas, 67-70, 73, 118;
carácter probabilístico de, no debe explicarse por la falta de conocimiento, 28-29, 70-71;
como mecánica atómica, diferenciada de la mecánica nuclear y de la hadrónica, 37;
como teoría de la estructura atómica, 35;
como teoría de las propensiones físicas, 118, 119, 155;
como teoría de partículas, 33-34, 144-145, 158-159;

como teoría ondulatoria, 144-145;
«completud» de, 28-38, 61, 141-143;
cuestión de diferencias con la física clásica, 164-165;
formalismo de, 36, 84-85, 119, 120-121;
incompletud del formalismo matemático de, 42-43; *sección 9;*
indeterminismo de, 29, 102-104, *sección 25;*
insuficiencias explicativas de, 119-120;
«inteligibilidad» de, 63-64, 66;
interpretación de Copenhague, *véase* Copenhague, interpretación de;
interpretación de los muchos-mundos de Everett, de, 107-113;
interpretación de según el sentido común, 25;
interpretación estadística de, 180;
interpretación física de, 120;
interpretación realista de, 25;
la teoría de partículas básicas para, 33, 212;
medición en, *véase* ahí;
objetividad de, 57, 138-140; *sección 7;*
observador en, 29, 42, *57-63,* 67, 70-71, 105-107, 138, 202-203;
orígenes de, 30-31, 34-35, 36;
ortodoxia de, *véase* Copenhague, interpretación de;
pensamiento del autor sobre el desarrollo de, 21, 117-119;
predicciones de—, son estadísticas, 80-81;
problemas de, 68-70;
su interpretación ligada a la interpretación de la teoría de la probabilidad, 84-85, 89, 117-118;
supone acción a distancia, 21-22, 42-45;
violación de las leyes de conservación, por la interpretación de los muchos-mundos de, 111.
Teorías de campos, 179, 208-209, *sección 26;*
Véase también Teoría unificada de campos.
Teoría electromagnética de la materia, 21, 59-60, 205-207;
Véase también Materia.
Teoría unificada de campos, 179-180, 205-211, 214.
«Tesis-del final-del-camino», 21-22, 29-*31,* 42;
abandonada por Pauli, 21;
base del choque entre Bohr y Einstein, 31, 34;
rechazada por Einstein, 30;
refutada por el descubrimiento de nuevas partículas, 35;
relacionada con la «ciencia normal», 30;
sostenida por Bohr, 33-34;
supuesta prueba de — de von Neumann, 34 y *n.*
Véase también Completud; Copenhague, interpretación de.
Tiempo, absoluto, *véase* Espacio y tiempo absolutos;
dirección del, 215;
reversibilidad del, según el modelo del experimento del billar romano, 106-108, 111-112.
Véase también Ecuación de ondas (Schrödinger).
Transición, de lo posible a lo real, *véase* Real; Reducción del paquete de ondas.

Universo, considerado como un sistema mecánico-cuántico en la interpretación de Everett, 108;
indeterminista, *215-217;*
problema de la estructura espacial de, 181.
Véase también Indeterminismo.
Universo, en bloque, programa metafísico de investigación de Parménides del, 178, 181-182.

Vaguedad, supuesta necesidad de, 75.
Variables ocultas, *34-*36.
Von Neumann supone que refutan la mecánica cuántica, 34 y *n.*
Véase también Copenhague, interpretación de; periodización de.
Vector de estado, derrumbamiento del, *véase* Reducción del paquete de ondas;
ramificación de, en el argumento de Everett, 109-112.
Véase también Teoría cuántica, interpretación de Everett.
Verdad, aproximación de las teorías a la, 62-66.
Vórtices, 182.

El *Post Scriptum* en su totalidad y, en particular, *Teoría cuántica y el cisma en física* proponen una nueva perspectiva cosmológica. En este volumen, Popper pone en relación un tema básico de su filosofía —que algo puede proceder de nada— con la situación actual de la teoría física.

Porque las ideas de Popper ponen profundamente en duda la sabiduría tradicional que pretende que «no hay nada nuevo bajo el sol» y que «*Ex nihilo nihil fit*». No existe la inducción científica. El futuro no está contenido en el pasado. Hay indeterminismo en la física y en la historia. Hay auténtica emergencia en biología. Los valores no pueden reducirse a hechos. La mente no puede reducirse a materia. Los niveles descriptivo y argumentativo del lenguaje no pueden reducirse a los niveles expresivo y señalizador. La conducta y la conciencia son las avanzadillas de la evolución, y los productos de la conciencia no están predeterminados. De ahí la importancia de la «sociedad abierta» en el «universo abierto». En *Teoría cuántica y el cisma en física*, el argumento crítico de Popper adquiere una nueva dimensión. Porque, a pesar del papel clave de la conciencia y sus productos en su filosofía, Popper, durante más de cincuenta años, se ha opuesto al intento de la mayoría de los físicos de introducir conciencia —y al «observador»— en la teoría cuántica. Tales son las ironías de la historia intelectual.

Sir Karl Popper es doctor «honoris causa» por catorce universidades estadounidenses, británicas, alemanas, austríacas, neozelandesas y canadienses. Es miembro de número u honorario de doce Academias. Algunas de sus obras se han traducido a veintidós idiomas.

La presente edición está preparada por William Warren Bartley III, graduado por Harvard y por la Universidad de Londres. Profesor en las universidades de Londres, Cambridge y Pittsburgh, actualmente es catedrático de Filosofía en la Universidad del Estado de California, en Hayward.

Filosofía y Ensayo

tecnos

W7-CJR-248